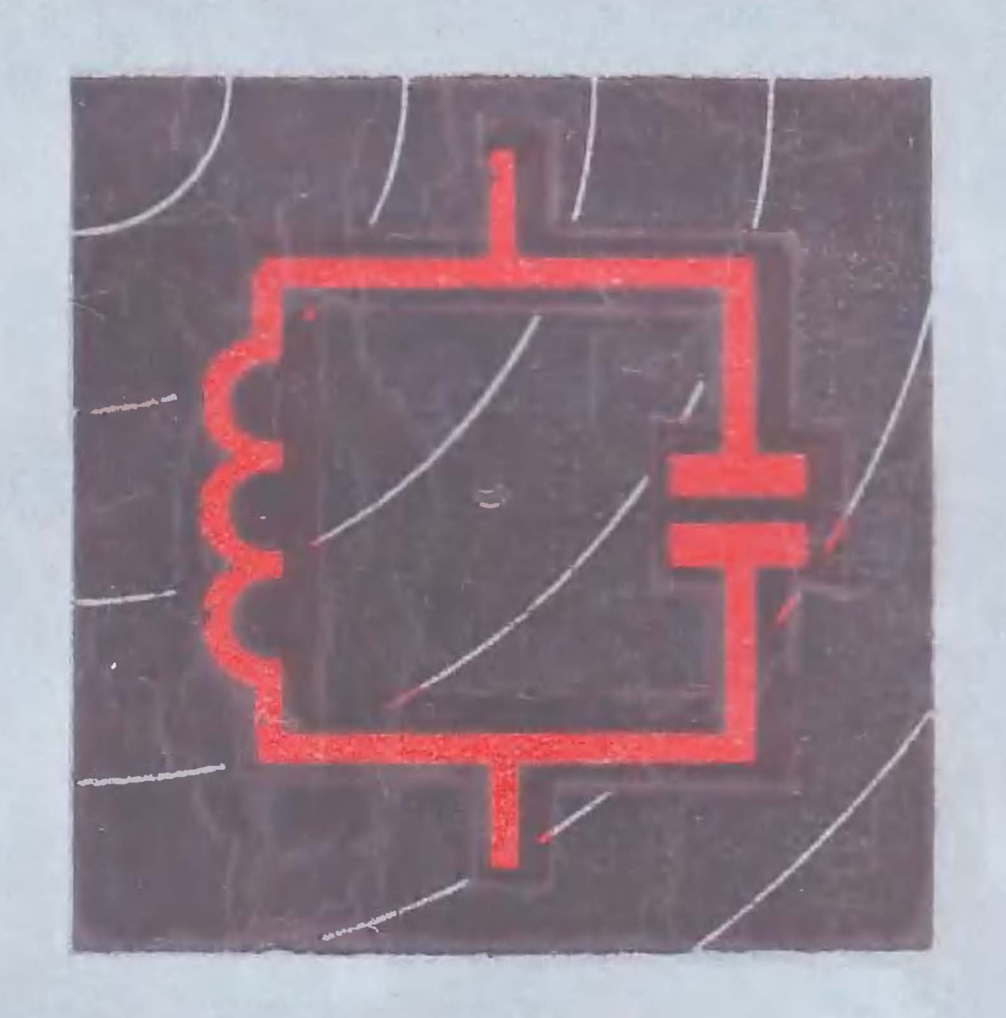
Ю. Ф. Скрипников




# КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР





6Ф2
С45
УДК 621.372.061



**Скрипников Ю. Ф.**

С 45 Колебательный контур. М., «Энергия», 1970.

128 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 739)

В брошюре приведены основы расчета параметров колебательных контуров и их элементов — конденсаторов и катушек индуктивности. Рассмотрены некоторые физические процессы, протекающие в контурах, конденсаторах и катушках индуктивности. Приведены справочные данные, необходимые для расчетов.

Брошюра рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

$\frac{3\text{-}4\text{-}5}{311\text{-}70}$ 6Ф2

**Скрипников Юрий Федорович**

*Колебательный контур*

Редактор *Б. А. Снедков*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Техн. редактор *М. П. Осипова*

Корректор *Е. Х. Горбунова*

Сдано в набор 23/XII 1969 г. Подписано к печати 19/V 1970 г. Т-06364
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 6,72 Уч.-изд. л. 7,07
Тираж 60 000 экз. Цена 31 коп. Зак. 2585

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Шлюзовая наб., 10.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Колебательные контуры находят широкое применение в промышленной и радиолюбительской аппаратуре. Колебательные контуры являются одной из важнейших составных частей радиоприемников, передатчиков, телевизоров. Поэтому предварительный расчет колебательных контуров и их элементов облегчает настройку устройств, в которых они применяются.

Конденсаторы, входящие в состав колебательных контуров, как правило, применяются промышленного изготовления и лишь в отдельных случаях изготовляются радиолюбителями самостоятельно. К таким конденсаторам относятся, в частности, конденсаторы переменной емкости. В настоящей брошюре приводятся расчеты конденсаторов переменной емкости, нашедших наиболее широкое применение. Наряду с расчетами приводятся параметры серийных конденсаторов, которые используются в колебательных контурах.

Катушки индуктивности, входящие в состав колебательных контуров, радиолюбителям приходится изготовлять в большинстве случаев самостоятельно. Поэтому в настоящей брошюре вопросу расчета катушек индуктивности уделено особое место. От качества катушек индуктивности в основном зависят свойства колебательных контуров, поэтому успешное конструирование катушек возможно при условии правильного выбора их параметров.

Отечественная литература по вопросам расчета параметров конденсаторов, катушек индуктивности и колебательных контуров достаточно обширна. Однако необходимый материал размещен во многих книгах и журналах, что создает определенные трудности при работе с ним. К тому же большой спрос на эту литературу делает ее библиографической редкостью. В настоящей работе автор сделал попытку систематизировать материал по этим вопросам. При подборе материала автор стремился более подробно осветить вопросы, имеющие наибольшее практическое значение и интересующие большинство радиолюбителей.

В брошюре приведены расчетные формулы, таблицы, графики и номограммы и лишь в отдельных случаях описания физических процессов, облегчающие пользование расчетным материалом. В брошюре не рассматриваются вопросы, связанные с практической стороной конструирования конденсаторов и катушек индуктивности, так как имеется в виду, что радиолюбитель знаком с этими вопросами.

Не следует считать брошюру полным рецептурным справочником по расчету колебательных контуров и их элементов. Приведенный в ней материал охватывает лишь наиболее распространенные случаи, с которыми может столкнуться радиолюбитель в своей работе.

*Автор*

# ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| | |
|---|---|
| Ток . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | $i$, $I$ |
| Напряжение . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | $U$ |
| Электродвижущая сила . . . . . . . . . . . . . | $E$ |
| Сопротивление активное . . . . . . . . . . . . . | $R$ |
| Эквивалентное сопротивление параллельного контура | $R_э$ |
| Сопротивление характеристическое . . . . . | $\rho$ |
| Сопротивление шунтирующее . . . . . . . . . . | $R_ш$ |
| Индуктивность . . . . . . . . . . . . . . . . . | $L$ |
| Емкость . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | $C$ |
| Начальная магнитная проницаемость . . . . . . . | $\mu_0$ |
| Динамическая магнитная проницаемость . . . . . | $\mu_д$ |
| Относительная диэлектрическая проницаемость . . | $\varepsilon$ |
| Частота колебаний . . . . . . . . . . . . . . . | $f$ |
| Резонансная частота контура . . . . . . . . . . . | $f_0$ |
| Угловая частота . . . . . . . . . . . . . . . . . | $\omega$ |
| Добротность . . . . . . . . . . . . . . . . . . | $Q$ |
| Полоса пропускания контура . . . . . . . . . . . | $П_{пр}$ |

*Глава первая*

# ЕМКОСТЬ И КОНДЕНСАТОРЫ

## Определяющие параметры конденсатора

Основной единицей емкости считается фарада, т. е. емкость, заряд которой равен 1 *к* при напряжении между обкладками конденсатора в 1 *в*

$$C = \frac{Q}{U},$$

где $C$— емкость, *ф*;

$Q$ — количество электричества, *к*;

$U$ — напряжение, *в*.

На практике применяются более мелкие единицы емкости:

$10^{-6}$ *ф*=1 микрофарада (1 *мкф*);

$10^{-9}$ *ф*=1 нанофарада (1 *нф*);

$10^{-12}$ *ф*=1 пикофарада (1 *пф*).

Конденсатор состоит из двух или нескольких пластин-проводников, именуемых обкладками, разделенными друг от друга изоляционным материалом — диэлектриком. Емкость конденсатора определяется тремя величинами:

1) площадью обкладок конденсатора;
2) расстоянием между обкладками;
3) диэлектрической проницаемостью материала между обкладками.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ — величина, показывающая, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора при заполнении пространства между пластинами конденсатора тем или иным материалом. Значения диэлектрической проницаемости некоторых материалов приведены в табл. 1.

Конденсатор из двух параллельных плоскостей— один из самых распространенных типов конденсаторов, так как прибор для получения заданной емкости при наименьшем объеме практически получается при параллельных пластинах, разделенных твердым диэлектриком или при жесткой конструкции пластин небольшим воздушным промежутком. Емкость двухпластинчатого плоскопараллельного конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{0,886\varepsilon S}{a},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *пф*;

$S$ — площадь пластин, *см*$^2$;

Таблица 1

**Диэлектрическая проницаемость материалов**

| Материал | ε | Материал | ε |
|---|---|---|---|
| Аминопласты | 5,0—9,0 | Сегнетокерамика | 450—1 700 |
| Бакелит | 4,0—4,6 | Слюда мусковит | 6,8—7,2 |
| Береза сухая | 3,0—4,0 | Слюда флогопит | 8,0 |
| Бумага кабельная | 4,0—4,8 | Смолы эпоксидные | 3,7—3,9 |
| Бумага конденсаторная | 3,5 | Совенит | 3,0—4,0 |
| Винипласт | 3,5—3,6 | Сосна сухая | 3,5 |
| Волокнит | 7,5 | Стеатит | 6,0—6,5 |
| Воск пчелиный | 2,8—2,9 | Стекло | 4,0—10 |
| Галовакс | 4,5—5,5 | Стеклотекстолит | 7,5—8,0 |
| Гетинакс А, Б, В, Г | 6,0—8,0 | Стекловолокнит | 8,0 |
| Дельта-древесина | 8,0 | Текстолит | 7,5—8,0 |
| Дуб сухой | 3,5 | Текстолит ВЧ | 7,5—8,0 |
| Канифоль | 3,5 | Тиконд | 70—150 |
| Капрон, нейлон | 3,8—4,2 | Термоконд | 16—25 |
| Каучук | 2,4 | Ультрафарфор | 6,0 |
| Кварц плавленый | 4,1—4,4 | Фторопласт | 2,5—2,7 |
| Лакоткань хлопчатобумажная | 4,0—4,6 | Фторопласт-4 | 1,9—2,2 |
| Лакоткань шелковая | 3,8—4,5 | Фибра | 3,5 |
| Микалекс | 8,0—10 | Фенопласт | 8,0 |
| Миканит | 6,0 | Фенопласт К-21-22 | 7,5—9,5 |
| Мрамор | 8,0—10 | Целлулоид | 5,5 |
| Неолейкорит | 6,5—7,5 | Целофан | 3,5—4,0 |
| Озокерит | 2,3 | Церезин | 2,1—2,3 |
| Органическое стекло | 3,5—3,6 | Шелк натуральный | 4,0—5,0 |
| Парафин | 2,1—2,2 | Щеллак | 3,5 |
| Полистирол | 2,4—2,6 | Эбонит | 2,7—3,0 |
| Полихлорвинил | 3,5—5,0 | Этилцеллюлоза | 3,5 |
| Полиэтилен | 2,2—2,3 | Эмаль стекловидная | 4,0—7,0 |
| Полипропилен | 2,0—2,1 | Электрокартон | 3,5 |
| Прессшпан | 3,0—4,0 | Янтарь | 2,8 |
| Резина | 3,0 | | |

*a* — расстояние между пластинами, *мм*;

ε — диэлектрическая проницаемость материала между обкладками.

На рис. 1 приведен график для определения емкости конденсатора по площади перекрытия и расстоянию между пластинами. Диэлектриком служит воздух, у которого величина ε равна единице. По этому графику удобно определять емкость конденсаторов, предназначенных для работы на УКВ. На рис. 2 приведена номограмма, позволяющая определять емкость плоскопараллельного конденсатора в широких пределах. Эти расчеты будут верными при том предположении, что электрические заряды распределены по всей площади пластин равномерно. Фактически по краям пластин района-

гаются дополнительные заряды, увеличивающие расчетную емкость. При ширине пластин конденсатора, более чем в десять превышающей расстояние между пластинами, влиянием этого эффекта можно пренебречь.

Для конденсатора с числом пластин $n$ емкость равна:

$$C = \frac{0,886\,(n-1)\,\varepsilon S}{a}.$$

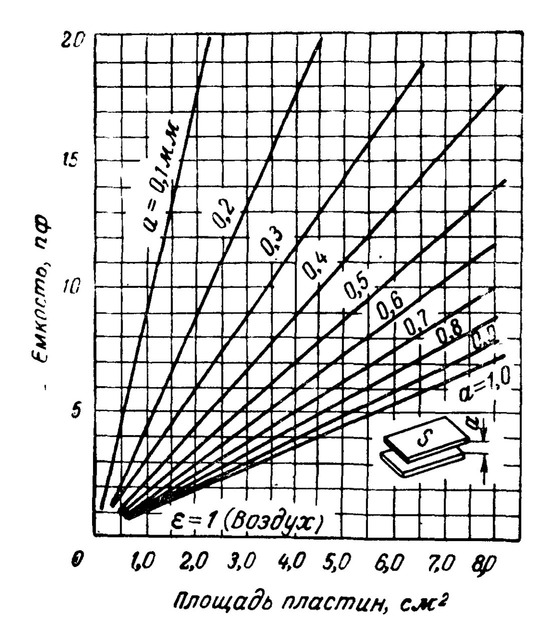



Рис. 1. График зависимости емкости конденсатора от площади перекрытия и расстояния между пластинами.

Для конденсатора с многослойным диэлектриком емкость определяется из выражения

$$C = \frac{0,886S}{\frac{a_1}{\varepsilon_1} + \frac{a_2}{\varepsilon_2} + \ldots + \frac{a_n}{\varepsilon_n}}.$$

Емкость отрезка коаксиального кабеля

$$C = \frac{0,24\varepsilon l}{\lg \frac{D}{d}},$$

где $C$ — емкость, *пф*;

$l$ — длина отрезка, *см*;

$D$ — внутренний диаметр наружного проводника, *см*;

$d$ — внешний диаметр внутреннего проводника, *см*.

Емкость отрезка двухпроводной линии

$$C=\frac{0,12\varepsilon l}{\lg\frac{2a}{D}},$$

где $C$ — емкость отрезка линии, *пф*;

$l$ — длина отрезка, *см*;

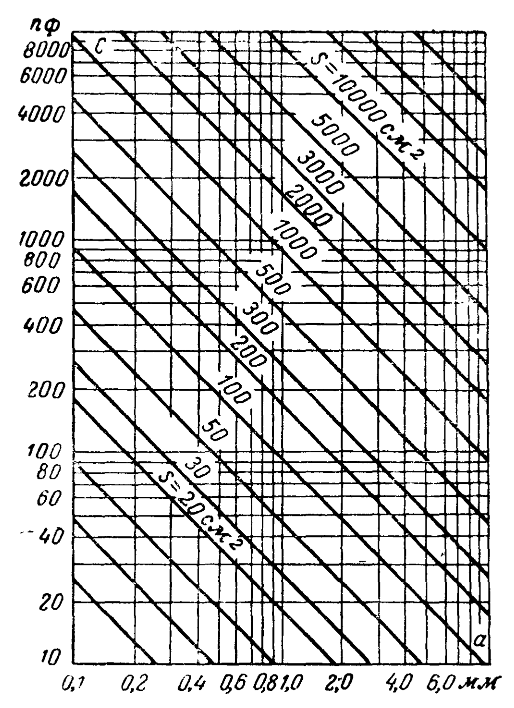



Рис. 2. Номограмма для расчета емкости плоскопараллельного конденсатора.

$a$ — расстояние между проводниками, *см*;

$D$ — диаметр проводников, *см*.

Емкость двух параллельных проводников радиусами $R$ и $r$ при условии $a \gg R > r$

$$C=\frac{0,556\varepsilon l}{\lg\frac{a^2}{rR}},$$

где $C$ — емкость, *пф*;

$l$ — длина проводников, *см*;

$a$ — расстояние между проводниками, *см*;
$R$ и $r$ — радиусы проводников, *см*.

Емкость прямого провода, параллельного земле, при условии $l>h>D$

$$C = \frac{0,24\varepsilon l}{\lg \frac{4h}{D}},$$

где $C$ — емкость провода, *пф*;
$l$ — длина провода, *см*;
$h$ — расстояние до земли, *см*;
$D$ — диаметр провода, *см*.

## Печатные конденсаторы

Печатные конденсаторы применяются в печатных схемах для различных блокировок и фильтрации частот порядка 70—100 *Мгц*, а также входят в состав контуров, выполненных печатным способом. Расчет емкости этих конденсаторов производится по формуле плоского конденсатора.

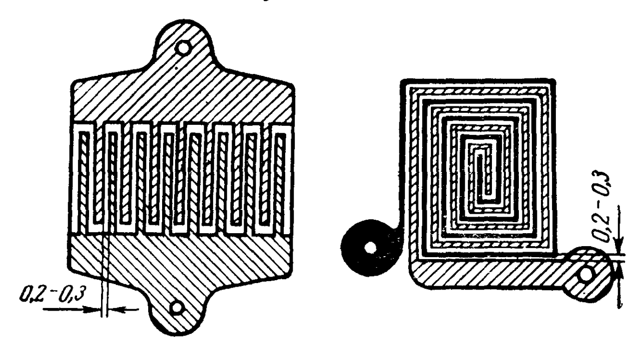



Рис. 3. Печатные конденсаторы одностороннего типа.

Обкладки печатных конденсаторов могут быть расположены как на обеих сторонах печатной платы, так и на одной стороне. Конденсаторы первого типа имеют большую емкость, величина которой определяется площадью обкладок, толщиной диэлектрика и его диэлектрической проницаемостью. Эта емкость обычно составляет 3—5 *пф/см*², при использовании плат из феноловых пластмасс— 10—15 *пф/см*² и 0,02—0,03 *мкф/см*² при использовании керамики с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Для уменьшения индуктивности обкладкам придается прямоугольная форма с соотношением сторон 1 : 2.

Конденсаторы небольшой емкости выполняются с обкладками, расположенными на одной стороне платы. Для увеличения емкости им придается зигзагообразная или гребенчатая форма (рис. 3). При ширине промежутка между торцами порядка 0,2 *мм* и основания со средней величиной диэлектрической проницаемости (4—5) емкость между торцами будет порядка 1,5—1,8 *пф/см*.

## Конденсаторы переменной емкости

**Конденсаторы переменной емкости** чаще всего используются для плавной настройки колебательных контуров. Наибольшее распространение получили **прямоемкостные** и **прямочастотные** конденсаторы переменной емкости.

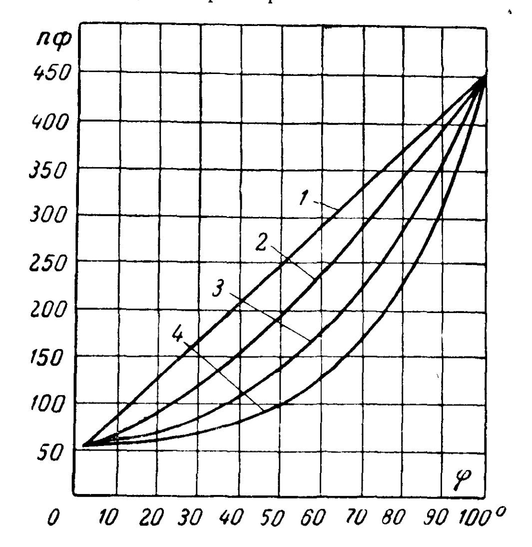



Рис. 4. Изменение емкости конденсаторов с различной формой пластин.

*1* — прямоемкостного; *2* — прямоволнового; *3* — логарифмического; *4* — прямочастотного.

На рис. 4 приведен сравнительный график изменения емкости конденсаторов с различной формой пластин, а на рис. 5 — форма пластин переменных конденсаторов, соответствующих графику. Как видно из графика для прямоемкостного конденсатора характерна

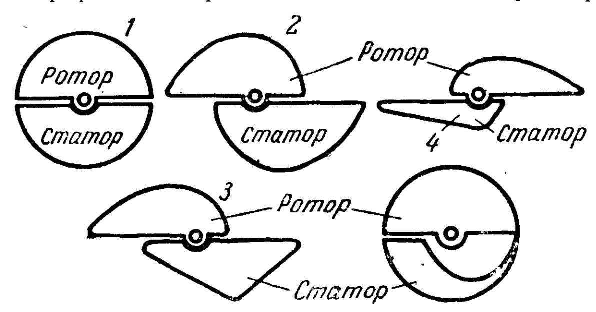



Рис. 5. Форма пластин конденсаторов переменной емкости.

линейная зависимость изменения емкости от угла поворота ротора. В случае применения прямочастотного конденсатора обеспечивается линейная зависимость между изменением частоты контура и углом поворота ротора.

Другой разновидностью конденсаторов переменной емкости является конденсатор с логарифмической формой пластин или среднелинейной. Основная особенность этого конденсатора заключается в том, что процентное изменение емкости, приходящееся на одно деление шкалы, остается одинаковым в любом месте шкалы. Это свойство облегчает спаривание конденсаторов на одной оси.

При расчете конденсаторов переменной емкости, работающих при высоких напряжениях, следует учитывать диэлектрическую прочность диэлектрика. Так как в большинстве случаев диэлектриком служит воздух, следует помнить, что при нормальном давлении и влажности критическое значение пробоя воздуха приблизительно равно 1 000 *в* на 1 *мм*. Принимая во внимание необходимость запаса по диэлектрической прочности, для конденсаторов переменной емкости следует принимать 1 *мм* зазора на каждые 500—700 *в* амплитуды напряжения.

Следует отметить, что пробивное напряжение конденсатора с воздушным диэлектриком зависит от толщины пластин и их обработки. При напряжении до 500 *в* толщина пластин $t$ берется от 0,5 до 3 *мм* и рассчитывается по формуле

$$t=0{,}3a,$$

где $a$ — расстояние между пластинами, *мм*.

При небольших зазорах (около 0,5—1,5 *мм*) толщина пластин определяется необходимостью обеспечить жесткость конструкции и берется порядка 0,7—0,9 *мм*.

При расчете конденсаторов переменной емкости необходимо предварительно найти минимальную $C_{мин}$ и максимальную $C_{макс}$ емкости. Максимальная емкость конденсатора определяется областью применения, а минимальная — его конструктивными данными: размерами, взаимным расположением ротора и статора, системой крепления статора и т. п.

Употребительные в практике значения максимальных и минимальных величин емкости применительно к приемо-передающим устройствам приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Емкость конденсаторов переменной емкости**

| Диапазон | ДВ | СВ | ПВ | КВ | УКВ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_{макс}$, *пф* | 450—750 | 250—450 | 150—250 | 50—150 | 40—50 | 20—35 | 15—20 |
| $C_{мин}$, *пф* | 15—25 | 10—15 | 8—12 | 6—10 | 5—7 | 3,5 | 3,5 |

Широкое применение находят конденсаторы переменной емкости, состоящие из нескольких конденсаторных секций, расположенных на одной оси. Наиболее употребительные блоки состоят из двух-

трех секций. При большом числе секций уменьшается механическая жесткость блока, увеличиваются его размеры и снижается стабильность из-за возможности прогиба длинной оси.

### Прямоемкостные конденсаторы

Прямоемкостные конденсаторы выполняются с полукруглой или секторообразной формой роторных пластин (рис. 6 и 7). У конденсатора с полукруглыми пластинами изменение емкости от минимального значения до максимального происходит при повороте ротора от 0 до 180°, а у конденсатора с секторообразными пластинами — от 0 до 90°. Преимуществом конденсатора второго типа является возможность последовательного соединения его статорных пластин (рис. 7,*б*), при этом повышается его рабочее напряжение.

Рабочей площадью пластин конденсатора первого типа при условии полного введения пластин ротора явится:

$$S=1{,}57(R^2-r^2),$$

где $R$ — радиус пластины;

$r$ — радиус внутреннего выреза в статоре.

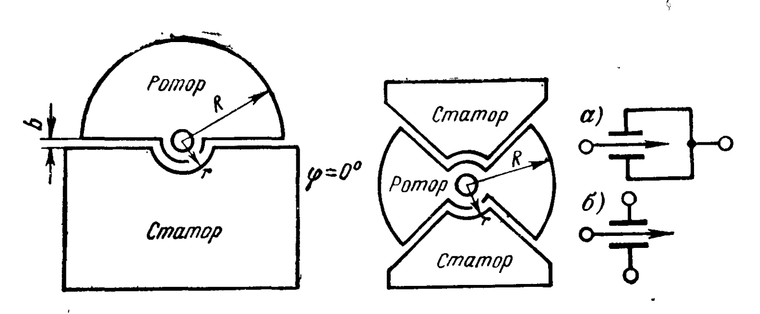



Рис. 6. Прямоемкостный конденсатор с полукруглой формой роторных пластин.

Рис. 7. Прямоемкостный конденсатор с секторообразной формой роторных пластин.

*а* — параллельное соединение статорных пластин; *б* — последовательное соединение статорных пластин.

Максимальная емкость переменной части конденсатора с полукруглыми пластинами

$$C_{\text{макс}}=\frac{0{,}139\,(n-1)\,(R^2-r^2)\,\varepsilon}{a},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *пф*;

$n$ — общее число пластин статора и ротора;

$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

Максимальная емкость переменной части каждого плеча конденсатора с секторообразными пластинами

$$C_{\text{макс}} = \frac{0,139(n-1)(R^2 - r^2)\varepsilon}{2a}$$

Общее число пластин $n$ конденсатора

$$n = 1 + \frac{7,2C_{\text{макс}}a}{R^2 - r^2}.$$

Емкость при заданном угле поворота ротора

$$C_{\varphi} = (C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}})\frac{\varphi}{\pi} + C_{\text{мин}},$$

где $\varphi$ — угол поворота ротора, *рад.*

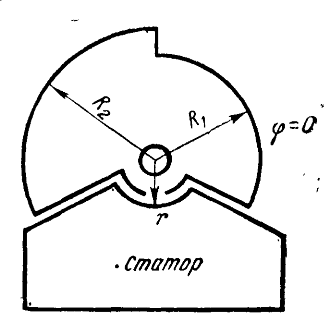



Рис. 8. Форма роторных пластин прямоемкостного конденсатора с углом поворота 240°.

На рис. 8 представлена форма пластины ротора прямоемкостного конденсатора с максимальным углом поворота 240°.

Максимальная емкость этого конденсатора определяется по формуле

$$C_{\text{макс}} = \frac{0,093(R_2^2 - r^2)(n-1)}{a},$$

где $R_2$ — больший радиус ротора, *см*;

$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см.*

Число пластин $n$ по заданным значениям $C_{\text{макс}}$ и $a$

$$n = 1 + 10,8 \cdot \frac{C_{\text{макс}}a}{R_2^2 - r^2},$$

где $a$ — расстояние между пластинами, *см.*

Меньший радиус пластин ротора $R_1$ определяется из выражения

$$R_1 = \frac{\sqrt{R_2^2 + r^2}}{2}.$$

### Прямоволновый конденсатор

Прямоволновый конденсатор при настройке контура дает равномерное изменение длины волны, приходящееся на каждое деление шкалы. Для получения прямолинейной зависимости

между длиной волны и углом поворота ротора необходимо выполнить условие

$$C_A = (aA + b)^2,$$

где $C_A$ — емкость конденсатора при $A$ делениях шкалы, *пф*;

$a$ и $b$ — коэффициенты, зависящие от максимальной и минимальной емкостей конденсатора.

Коэффициенты $a$ и $b$ равны:

$$a \approx \frac{\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{мин}}}}{100}; \quad b = \sqrt{C_{\text{мин}}}.$$

Максимальная емкость прямоволного конденсатора

$$C_{\text{макс}} = \frac{0,0695\,(n-1)\,(R^2 - r^2)\,\varepsilon}{a}.$$

Емкость при заданном угле поворота ротора

$$C_\varphi = \left(2\sqrt{C_{\text{макс}} C_{\text{мин}}} - C_{\text{мин}}\right)\frac{\varphi}{\pi} + \left(\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{мин}}}\right)^2 \left(\frac{\varphi}{\pi}\right)^2 + C_{\text{мин}}.$$

Кривая внешнего радиуса пластин, *см*

$$R = \sqrt{(R_{\text{макс}}^2 - r^2)\frac{\varphi}{\pi} + r^2}.$$

### Прямочастотный конденсатор

Пластины ротора прямочастотного конденсатора имеют форму, изображенную на рис. 9. Текущий радиус пластин ротора рассчитывается по формуле

$$r_{\text{т}} = R_{\text{макс}} \sqrt{\frac{1 - \frac{r^2}{R_{\text{макс}}^2}}{\left[1 + (k_f - 1)\frac{\varphi}{\pi}\right]^2} + \frac{r^2}{R_{\text{макс}}^2}},$$

где $R_{\text{макс}}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;

$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;

$\varphi$ — угол поворота ротора, для которого рассчитывается значение радиуса $r_{\text{т}}$;

$k$ — коэффициент перекрытия, равный $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$.

Число пластин $n$ конденсатора

$$n = 1 + 14,4\,C_{\text{макс}} \frac{(k_f - 1)\,a k_f^2}{(R_{\text{макс}}^2 - r^2)(k_f^2 - 1)},$$

где $C_{\text{макс}}$ — максимальная емкость переменной части конденсатора, *пф*;

$R_{макс}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;
$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;
$k_f$ — коэффициент перекрытия;
$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

### Логарифмический конденсатор

Максимальная емкость логарифмического конденсатора

$$C_{макс} = \frac{0{,}0695\,(n-1)\,(R_{макс}^2 - r^2)\left(1 - \frac{C_{мин}}{C_{макс}}\right)\varepsilon}{a \ln \frac{C_{макс}}{C_{мин}}},$$

где $C_{макс}$ — максимальная емкость переменной части конденсатора *пф*;

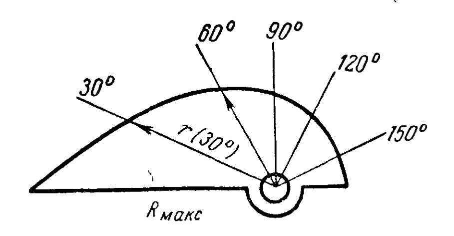



Рис. 9. Форма роторных пластин прямочастотного конденсатора.

$R_{макс}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;
$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;
$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

Текущий радиус пластин ротора

$$r_т = \sqrt{(R_{макс}^2 - r^2)\left(\frac{C_{макс}}{C_{мин}}\right)^{\frac{\varphi - \pi}{\pi}} + r}.$$

При расчете конденсаторов переменной емкости общее число пластин $n$ следует выбирать исходя из следующих соображений: при большом числе пластин длина конденсатора получается чрезмерной, при малом — возрастает размер пластин, что понижает их жесткость и увеличивает габариты конденсатора. Число пластин следует выбирать так, чтобы длина конденсаторной секции примерно была равна среднему радиусу ротора. Ориентировочное число пластин конденсатора можно выбрать по табл. 3.

Таблица 3

**Число пластин конденсаторов переменной емкости**

| $C_{макс}$, *пф* | До 750 | 350—500 | 200—300 | 100—150 | 50—60 | 40—50 | 25—35 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | До 33 | 15—25 | 9—11 | 7—13 | 7—13 | 5—11 | 3—7 |

## Конденсаторы переменной емкости с твердым диэлектриком

Уменьшение размеров конденсаторов переменной емкости достигается при использовании в качестве диэлектрика материалов с большей, чем у воздуха диэлектрической проницаемостью, причем толщина диэлектрика может быть значительно меньше воздушного зазора, а также значительно тоньше могут быть и пластины. В конденсаторах подобного типа диэлектрик получается многослойным, состоящим из чередующихся слоев твердого диэлектрика и воздуха. Емкость конденсатора с таким диэлектриком равна:

$$C = \frac{A}{\frac{a_1}{\varepsilon_1} + \frac{a_2}{\varepsilon_2}},$$

где

$$A = \frac{S(n-1)}{3,6\pi};$$

$a_1$ и $a_2$ — толщины твердого диэлектрика и воздушной прослойки, *см*; $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$ — их диэлектрические проницаемости.

При расчетах удобней пользоваться понятием эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$ многослойного диэлектрика, при которой конденсатор обладает такой же емкостью, как и при многослойном диэлектрике. Толщина эквивалентного диэлектрика равна:

$$a = a_1 + a_2.$$

Следовательно,

$$C = A\frac{\varepsilon_э}{a}.$$

В конденсаторах подобного типа в качестве второго диэлектрика применяется воздух, у которого $\varepsilon_2 = 1$, тогда $\varepsilon_э$ равна:

$$\varepsilon_э = \varepsilon_1 \frac{1 + \frac{a_2}{a_1}}{1 + \frac{a_2}{a_1}\varepsilon_1}.$$

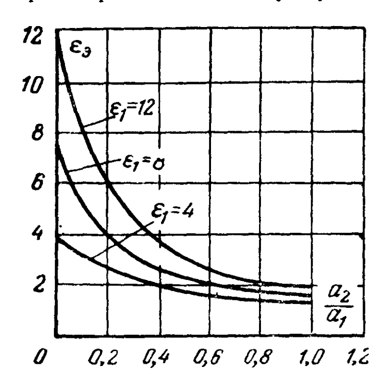



Рис. 10. График для определения эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$.

На рис. 10 представлена зависимость эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$ от отношения $a_2/a_1$ при различных значениях диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика.

Следует отметить, что величина потерь $\operatorname{tg}\delta$ в конденсаторах с твердым диэлектриком больше, чем при воздушном диэлектрике и определяется в основном потерями в твердом диэлектрике. На практике используются два способа расположения твердого диэлек-

трика: в виде прокладки между пластинами и в виде тонкой пленки, нанесенной на пластины. Материалом для прокладок служит пленка из полистирола, фторопласта-4, слюды и других материалов толщиной 0,05—0,2 *мм.*

Достоинством таких конденсаторов являются малые габариты при большой емкости, простота изготовления, а недостатком — низкие стабильность и точность. Такие конденсаторы применяются в неответственных устройствах, когда к точности и стабильности не предъявляется особых требований.

Конструктивной особенностью сдвоенных блоков из конденсаторов с твердым диэлектриком является расположение статорных и роторных секций под углом 180° друг к другу, что в свою очередь уменьшает связь между ними, не увеличивая габаритов блока. Такие конденсаторы делаются в основном прямоемкостными, и их расчет производится обычным методом, следует только в расчетные формулы ввести значения $\varepsilon_э$.

Соотношения между максимальной и минимальной емкостями характеризуются следующими данными:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $C_{макс}$, *пф* . . . . | 180 | 230 | 300 | 370 |
| $C_{мин}$, *пф* . . . . | 7 | 8 | 10 | 10 |

Общее число пластин при этих значениях емкости лежит в пределах от 16 до 30.

## Конденсатор в цепи переменного тока

При включении идеального конденсатора, т. е. конденсатора, не имеющего потерь, в цепь переменного тока с частотой $\omega$ и известной амплитудой переменного напряжения $U_{макс}$, амплитуда тока в цепи конденсатора будет определяться по закону Ома:

$$I_{макс} = \omega C U_{макс},$$

а для цепи, содержащей активное сопротивление $R$, присоединенное к источнику с напряжением $U_{макс}$, амплитуда тока будет равна:

$$I_{макс} = \frac{U_{макс}}{R}.$$

Сравнивая два последних выражения, можно заметить, что амплитуда тока в цепи конденсатора такова, как если бы вместо конденсатора было включено активное сопротивление

$$R = \frac{1}{\omega C}.$$

Следовательно, для переменного тока конденсатор представляет сопротивление, величина которого равна:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

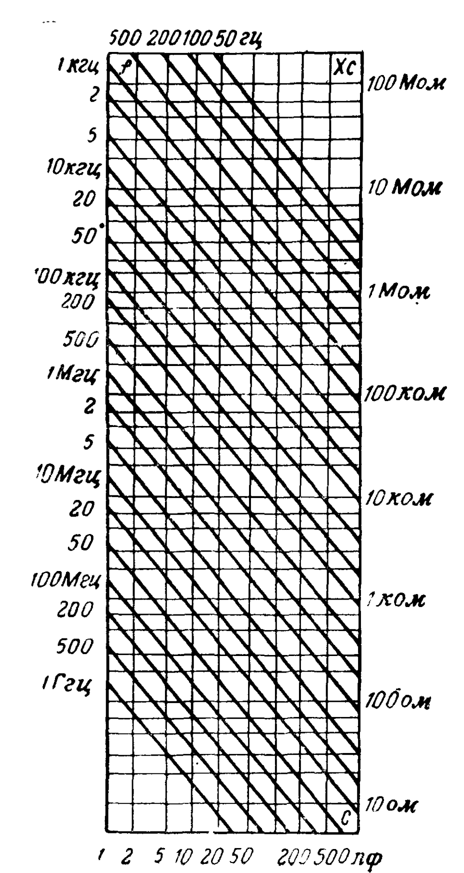



Рис. 11. Номограмма для расчета емкостного сопротивления конденсаторов.

Это сопротивление конденсатора называется реактивным сопротивлением и обозначается буквой $X$, а буква $C$ в индексе указывает, что это сопротивление емкостное.

Емкостное сопротивление имеет существенное отличие от активного, которое заключается главным образом в вопросе о потреблении мощности. В активном сопротивлении вся мощность, отдаваемая источником, превращается в тепло и расходуется на нагревание активного сопротивления. В случае емкостного сопротивления вся работа, совершаемая источником при заряде конденсатора, превращается в энергию электрического поля конденсатора. При разряде конденсатора вся энергия его электрического поля возвращается в источник. Можно считать, что вся энергия, накопленная в конденсаторе за четверть периода, пока он заряжался, полностью возвращается в источник за следующую четверть периода. Следовательно, конденсатор без потерь не потребляет энергии от источника.

Сопротивления, не расходующие полученную от источника энергию, а возвращающие ее источнику, называются реактивными сопротивлениями.

Для звуковых частот емкостное сопротивление можно определять по формуле

$$X_C = \frac{159\,000}{fC},$$

где $X_C$ — емкостное сопротивление, *ом*;
$f = \omega/2\pi$ — частота тока в цепи, *гц*;
$C$ — емкость конденсатора, *мкф*.

Емкостное сопротивление конденсатора в зависимости от длины волны определяется по формуле

$$X_C = \frac{530\lambda}{C},$$

где $X_C$ — емкостное сопротивление, *ом*;

$\lambda$ — длина волны, *м*;

$C$ — емкость конденсатора, *пф*.

При токе с частотой 50 *гц* формула для определения емкостного сопротивления конденсатора имеет вид:

$$X_C = \frac{3\,180}{C},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *мкф*.

Для быстрого определения величины $X_C$ служит номограмма (рис. 11), на которой наглядно представлены величины емкостного сопротивления конденсаторов различной емкости на частотах от 50 *гц* до 1 *Ггц*. В табл. 4 и 5 приводятся значения емкостных сопротивлений для различных величин емкости как для низких, так и высоких частот.

Таблица 4

**Емкостное сопротивление конденсаторов на низких частотах, *ом***

| Емкость, *мкф* | Частота | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 *гц* | 250 *гц* | 500 *гц* | 1 000 *гц* | 2 500 *гц* | 5 000 *гц* | 10 000 *гц* |
| 0,1 | 32 000 | 6 400 | 3 200 | 1 600 | 640 | 320 | 160 |
| 0,5 | 6 400 | 1 280 | 640 | 320 | 128 | 64 | 32 |
| 1,0 | 3 200 | 640 | 320 | 160 | 64 | 32 | 16 |
| 2,0 | 1 600 | 320 | 160 | 80 | 32 | 16 | 8 |
| 3,0 | 1 060 | 212 | 106 | 53 | 21,2 | 10,6 | 5,3 |
| 4,0 | 800 | 160 | 80 | 40 | 16 | 8 | 4 |
| 5,0 | 640 | 128 | 64 | 32 | 12,8 | 6,4 | 3,2 |
| 10,0 | 320 | 64 | 32 | 16 | 6,4 | 3,2 | 1,6 |
| 50,0 | 64 | 12,8 | 6,4 | 3,2 | 1,28 | 0,64 | 0,32 |
| 100,0 | 32 | 6,4 | 3,2 | 1,6 | 0,64 | 0,32 | 0,16 |

Другое существенное отличие емкостного сопротивления от активного состоит в том, что в емкостном сопротивлении ток сдвинут по фазе относительно напряжения на 90°, в то время как в активном сопротивлении ток совпадает по фазе с напряжением.

Если к конденсатору приложено напряжение

$$u = U_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi),$$

то ток в цепи

$$i = I_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ),$$

следовательно, напряжение на четверть периода отстает от тока.

Реальный конденсатор всегда обладает электрическими тепловыми потерями. Потери в конденсаторах вызываются замедленной поляризацией и проводимостью диэлектрика. В схемах замещения

Таблица 5.

## Емкостное сопротивление конденсатора на высокой частоте, *ом*

| Емкость | Частота | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 *Мгц* | 10 *Мгц* | 5 *Мгц* | 3 *Мгц* | 1,5 *Мгц* | 600 *кгц* | 468 *кгц* | 200 *кгц* |
| 10 *пф* | 530 | 1 590 | 3 180 | 5 300 | 10 600 | 26 500 | 34 000 | 79 500 |
| 20 *пф* | 265 | 795 | 1 590 | 2 650 | 5 300 | 13 250 | 17 000 | 39 800 |
| 50 *пф* | 106 | 318 | 635 | 1 060 | 2 120 | 5 300 | 6 800 | 15 900 |
| 100 *пф* | 53,0 | 159,0 | 318,0 | 530 | 1 060 | 2 650 | 3 400 | 7 950 |
| 200 *пф* | 26,5 | 79,5 | 159,0 | 265 | 530 | 1 325 | 1 700 | 3 980 |
| 500 *пф* | 10,6 | 31,8 | 63,5 | 106 | 212 | 530 | 680 | 1 590 |
| 1 000 *пф* | 5,30 | 15,90 | 31,8 | 53,0 | 106,0 | 265 | 340 | 795 |
| 2 000 *пф* | 2,65 | 7,95 | 15,9 | 26,5 | 53,0 | 132 | 170 | 398 |
| 5 000 *пф* | 1,06 | 3,18 | 6,35 | 10,6 | 21,2 | 53 | 68 | 159 |
| 0,01 *мкф* | 0,530 | 1,590 | 3,18 | 5,30 | 10,6 | 26,5 | 34 | 79,5 |
| 0,02 *мкф* | 0,265 | 0,795 | 1,59 | 2,65 | 5,30 | 13,2 | 17,0 | 39,8 |
| 0,05 *мкф* | 0,106 | 0,318 | 0,635 | 1,06 | 2,12 | 5,3 | 6,8 | 15,9 |
| 0,1 *мкф* | 0,0530 | 0,1590 | 0,318 | 0,530 | 1,06 | 2,65 | 3,40 | 7,95 |
| 0,2 *мкф* | 0,0265 | 0,0795 | 0,159 | 0,265 | 0,53 | 1,32 | 1,70 | 3,98 |
| 0,5 *мкф* | 0,0106 | 0,0318 | 0,0635 | 0,106 | 0,212 | 0,53 | 0,68 | 1,59 |
| 1 *мкф* | 0,00530 | 0,0159 | 0,0318 | 0,530 | 0,106 | 0,265 | 0,34 | 0,795 |
| 2 *мкф* | 0,00265 | 0,00795 | 0,0159 | 0,0265 | 0,053 | 0,132 | 0,17 | 0,398 |
| 6 *мкф* | 0,00088 | 0,00265 | 0,0053 | 0,0099 | 0,017 | 0,044 | 0,058 | 0,133 |

конденсатор с потерями изображается в виде чистой емкости $\tilde{C}$, к которой параллельно или последовательно подключено активное сопротивление. Наличие активного сопротивления вызывает некоторый сдвиг фаз, и ток опережает напряжение, приложенное к конденсатору, на несколько меньший, чем 90°, угол. Этот сдвиг фаз определяется тангенсом угла $\operatorname{tg}\delta$, где $\delta$ является углом потерь. Практически эта величина представляет отношение эквивалентного последовательного сопротивления к емкостному на рассматриваемой частоте.

Величина потерь для последовательной схемы замещения равна:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_R}{U_C} = R\omega C_R,$$

а для параллельной

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R\omega C_R},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока в цепи.

Величина, обратная $\operatorname{tg}\delta$, называется добротностью конденсатора

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta}$$

и может достигать нескольких тысяч.

Современные конденсаторы (кроме электролитических) характеризуются очень малыми потерями; $\delta \ll 3'$ и $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}01$—$0{,}001$.

У конденсатора с малыми потерями сдвиг фаз между током и напряжением близок к 90°. Поэтому реактивная мощность равна:

$$P_р = UI\sin\varphi \approx UI.$$

Так как ток через конденсатор $I = U\omega C$, то $P_р = U^2\omega C$. Достигаемое значение амплитуды переменного напряжения на конденсаторе, при котором реактивная мощность равна $P_р$, определяется из выражения

$$U_{макс} = 556\sqrt{\frac{P_р}{fC}},$$

где $U_{макс}$ — амплитуда напряжения на конденсаторе, *в*;
$f$ — частота, *Мгц*;
$C$ — емкость конденсатора, *пф*.

Реактивная мощность выражается в реактивных вольт-амперах. При переменных напряжениях выше допустимого происходит перегрев диэлектрика и разрушение конденсатора.

Одним из недостатков конденсаторов является наличие у них индуктивности. Индуктивность слагается из индуктивности рабочего элемента конденсатора и индуктивности внешних и внутренних соединительных проводников. Индуктивность конденсатора зависит от размеров рабочего элемента, его расположения относительно корпуса, длины выводов и др. Присутствие индуктивности увеличивает эквивалентную емкость и вызывает появление резонансных явлений в конденсаторе. На рис. 12 изображена простейшая схема

конденсатора с собственной индуктивностью. При резонансе, т. е. при

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

сопротивление этой цепи минимально и равно активному сопротивлению потерь. Для частот, отличных от резонансной, полное сопротивление конденсатора имеет реактивный характер; для низких — емкостный, а на высоких — индуктивный.

Нормальное использование конденсатора может происходить лишь на частотах ниже резонансной, на которых он имеет емкостное сопротивление. Для нормальной работы конденсаторов необходимо выполнение условия

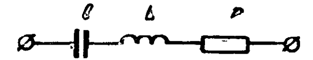



Рис. 12. Эквивалентная схема конденсатора с собственной индуктивностью.

$$f_{макс} = \frac{f_0}{2 \div 3},$$

где $f_{макс}$ — максимальная рабочая частота;

$f_0$ — резонансная частота конденсатора.

Таблица 6

**Индуктивность и максимальные рабочие частоты конденсаторов**

| Тип | $L$, *нгн* | $f_{макс}$, *Мгц* |
|---|---|---|
| Слюдяной, малого размера КСО-1 — КСО-7 | 4—6 | 150—200 |
| Слюдяной, среднего размера КСО-11 | 15—25 | 75—100 |
| Слюдяной, большого размера | 50—100 | 1—1,5 |
| Керамический, дисковый, малого размера КД-1 | 1—1,5 | 2 000—3 000 |
| Керамический, дисковый, среднего размера КД-2, КДУ | 2—4 | 200—500 |
| Керамический, трубчатый, малого размера КТ-1 | 3—10 | 150—200 |
| Керамический, трубчатый, среднего размера КТ-3 | 20—30 | 50—70 |
| Бумажный, малого размера в цилиндрическом корпусе с паяными торцами КБГ-И | 6—11 | 50—80 |
| Бумажный, среднего размера в цилиндрическом корпусе, с непаяными торцами КБГ-М | 30—60 | 3—5 |
| Бумажный, большой емкости | 50—100 | 1—1,5 |
| Переменной емкости, среднего размера, с воздушным диэлектриком | 10—60 | 50—100 |
| Переменной емкости, малого размера | 6—20 | 300—350 |

На частотах, близких к резонансной, индуктивное сопротивление компенсирует емкостное, т. е. способствует уменьшению общего реактивного сопротивления. На частотах выше резонансной реактивное сопротивление конденсатора меняет свой знак и становится индуктивным. Для некоторых типов конденсаторов зависимость $f_0$ от величины емкости и длины выводов показана графически на рис. 13. В табл. 6 приведены величины индуктивности стандартных конденсаторов и их максимальные рабочие частоты.

Другим важным фактором, характеризующим конденсатор, является стабильность. Стабильность конденсатора определяется изменением его основных параметров, главным образом емкости, под воздействием внешней среды. Изменения емкости, вызываемые действием температуры, характеризуются **температурным коэффициентом емкости** (ТКЕ), представляющим относительное изменение емкости при изменении температуры на 1° С:

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_2 - C_1}{C_{20} \Delta t^\circ},$$

где $C_2$ — емкость конденсатора при температуре нагрева;

$C_1$ — то же при начальной температуре.

В зависимости от вида конденсатора ТКЕ может быть положительным, отрицательным или близким к нулю; ТКЕ обычно выражается в миллионных долях изменения емкости к одному градусу ($10^{-6}$/° С). По величине ТКЕ конденсаторы подразделяются на группы, которым присвоены цифровые и буквенные символы, а также цвета для окраски корпуса. В табл. 7 приведены группы температурной стабильности стандартных конденсаторов постоянной емкости, а на рис. 14 — зависимость относительного изменения емкости керамических конденсаторов различной окраски от температуры. Температурная зависимость емкости слюдяных конденсаторов обозначается буквами от А до Г. Соответствующие им значения ТКЕ приведены в табл. 7.

Керамические конденсаторы КТ, КД, КДС и др. окрашены в разные цвета, которые характеризуют стабильность их емкости при изменениях температуры. Емкость конденсаторов серого, голубого и синего цветов при изменении температуры изменяется

Таблица 7

**Группы температурной стабильности конденсаторов**

| Группа | ТКЕ, *%/град* | Цвет корпуса |
|---|---|---|
| А | Не нормируется | — |
| Б | ±0,02 | — |
| **В** | ±0,01 | — |
| Г | ±0,005 | — |
| К | —(0,13±0,02) | Зеленый или красный с зеленой точкой |
| Д | —(0,07±0,01) | Красный |
| Л | —(0,0075±0,003) | Белый |
| М | —(0,005±0,003) | Голубой |
| Р | +(0,003±0,003) | Серый |
| С | +(0,0120±0,003) | Синий |
| Н | Не нормируется | Оранжевый или желтый |

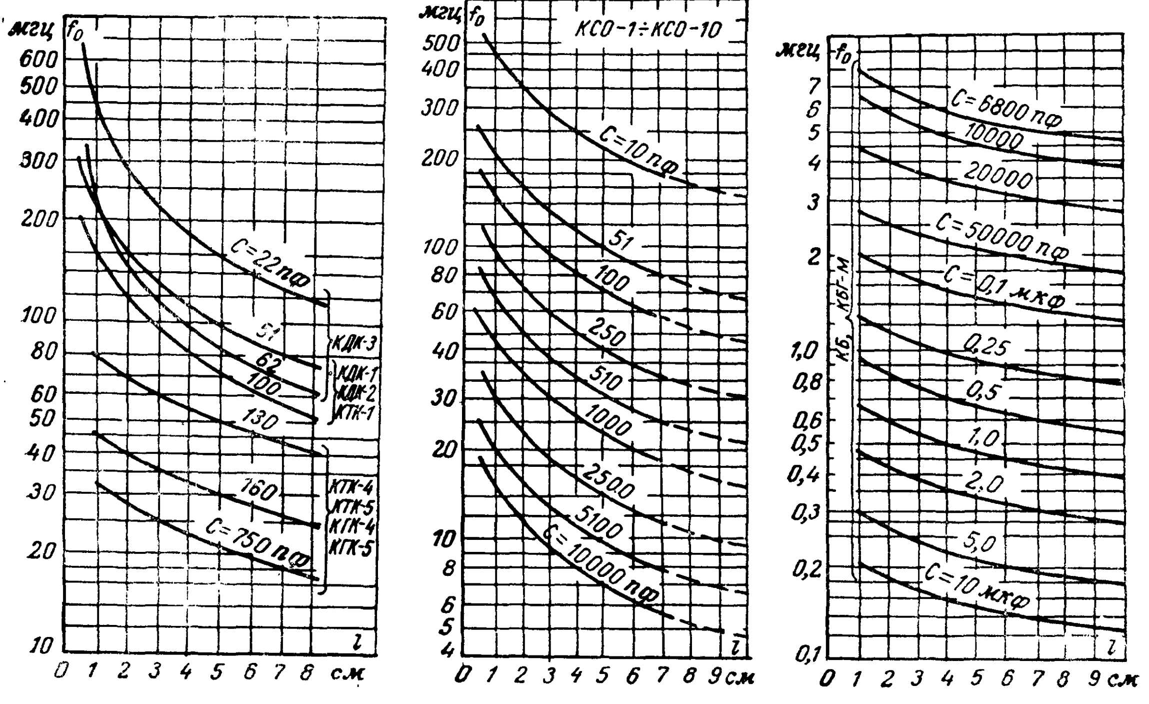



Рис. 13. Графики резонансных частот конденсаторов.

незначительно (рис. 14,*а*), такие конденсаторы называются **термостабильными**. Емкость конденсаторов зеленого и красного цветов при увеличении температуры заметно уменьшается (рис. 14,*б*). Эти конденсаторы называются **термокомпенсирующими**. При использовании в резонансных контурах они дают возможность значительно улучшить стабильность их частоты при колебаниях температуры. Конденсаторы оранжевого цвета при изменениях температуры изменяют емкость в широких пределах.

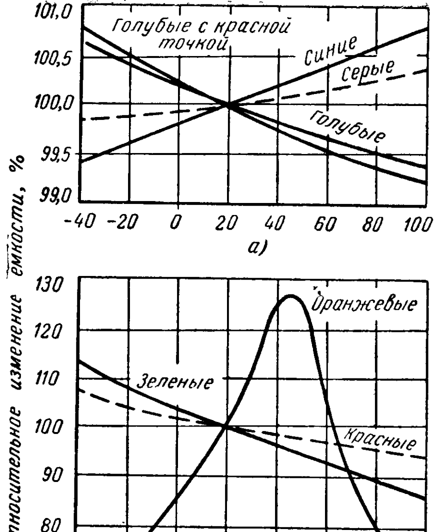



Рис. 14. Изменение емкости керамических конденсаторов различной окраски при изменениях температуры.
*а* — термостабильных; *б* — термокомпенсирующих и сегнетокерамических.

В практике встречаются керамические конденсаторы с нанесенными на них буквами и цифрами. При этом независимо от цвета окраски их корпуса стабильность емкости определяется так: конденсатор с маркировкой П33 или Р соответствует серому конденсатору, с маркировкой М47 или М — голубому, с маркировкой П120 или С — синему, с маркировкой М1300 или К — зеленому, с маркировкой М700 или Д — красному, с маркировкой М75 или Л — голубому с красной точкой, с маркировкой Н70 — оранжевому.

У воздушных конденсаторов переменной емкости ТКЕ обычно во много раз превышает величину температурного коэффициента диэлектрической проницаемости воздуха ($2\cdot10^{-6}$) и для различных конструкций может изменяться в пределах от $+150\cdot10^{-6}$ до $-70\cdot10^{-6}$. Часто поведение конденсаторов при изменении температуры бывает не цикличным, т. е. после нагрева и охлаждения емкость не возвращается к своему первоначальному значению.

## Соединение конденсаторов

На рис. 15 показано последовательное соединение конденсаторов. Общая емкость цепи определяется по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$

и будет меньше емкости наименьшего конденсатора этой цепи.

Общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

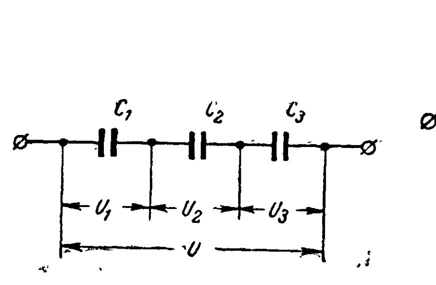



Рис. 15. Последовательное соединение конденсаторов.

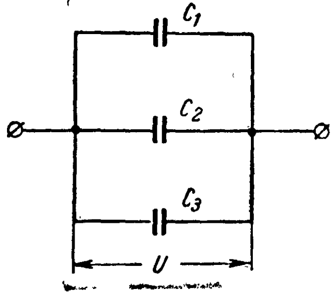



Рис. 16. Параллельное соединение конденсаторов.

Напряжения на конденсаторах обратно пропорциональны их емкости:

$$U_1 : U_2 : U_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}.$$

При последовательном соединении конденсаторов одинаковой емкости $C_1$ общая емкость равна:

$$C_{общ} = \frac{C_1}{n}.$$

Емкость двух последовательно соединенных конденсаторов рассчитывается по формуле

$$C_{общ} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

На рис. 16 приведена схема параллельного соединения конденсаторов. Общая емкость цепи равна сумме емкостей всех конденсаторов:

$$C_{общ} = C_1 + C_2 + C_3.$$

На рис. 17 приведена номограмма для расчета общей емкости двух последовательно соединенных конденсаторов. Для расчета по номограмме величины емкостей следует брать в одинаковых единицах.

При параллельном соединении $n$ конденсаторов одинаковой емкости $C_1$ общая емкость равна:

$$C_{общ} = C_1 n.$$

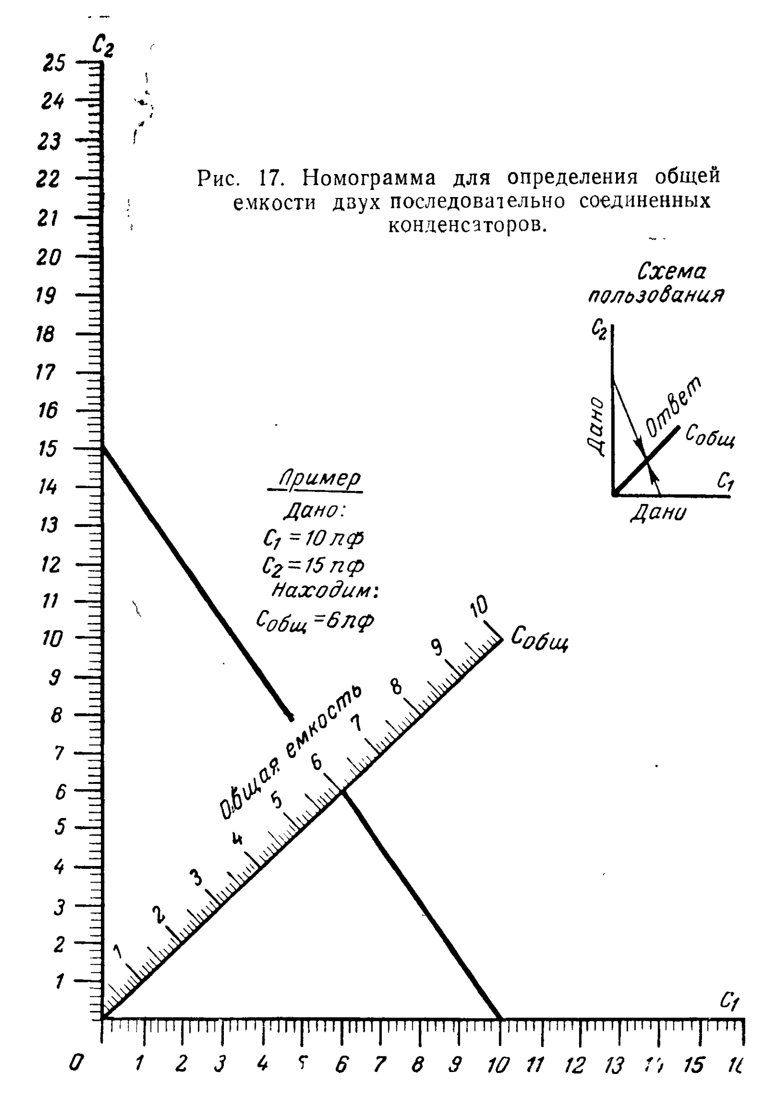



Рис. 17. Номограмма для определения общей емкости двух последовательно соединенных конденсаторов.

*Глава вторая*

# КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Единица измерения индуктивности — генри. Индуктивностью в 1 *гн* обладает катушка, в которой возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 *в* при изменении тока в катушке на 1 *а* в 1 *сек.*

На практике применяются более мелкие единицы индуктивности — 1 миллигенри $= 10^{-3}$ *гн* и 1 микрогенри $= 10^{-6}$ *гн*.

По своему назначению катушки индуктивности можно разделить на следующие группы: катушки контуров, катушки связи, дроссели высокой частоты и дроссели низкой частоты.

По конструктивному признаку катушки делятся на однослойные и многослойные, экранированные и неэкранированные, катушки с сердечниками и без сердечников, катушки цилиндрические, плоские, тороидальные и печатные.

Катушки индуктивности характеризуются следующими основными параметрами: величиной индуктивности, добротностью, собственной емкостью и стабильностью. Основные параметры катушек индуктивности приведены в табл. 8.

## Расчет индуктивности

Индуктивность прямого провода круглого сечения

$$L = 2l\left(2,3\lg\frac{4l}{d} + \frac{d}{2l} - 1\right)10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность, *мкгн*; $l$ — длина провода, *см*; $d$ — диаметр провода, *см*.

На рис. 18 показан график для определения индуктивности прямого провода круглого сечения. Следует отметить, что приведенная формула относится к проводам из немагнитного материала.

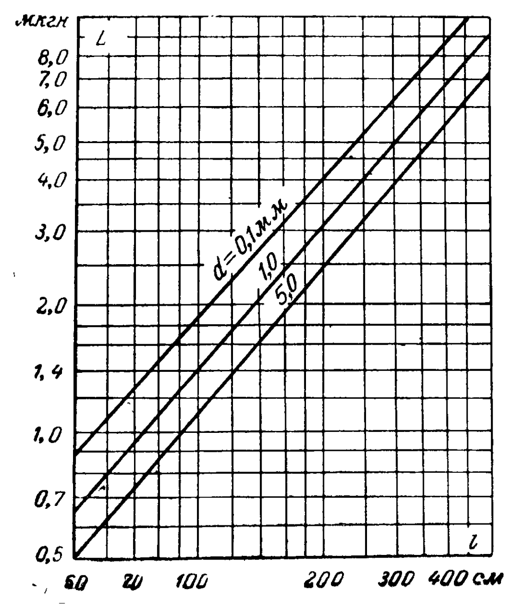



Рис. 18. Индуктивность прямого одиночного провода в зависимости от его длины и диаметра.

Таблица 8

## Основные параметры катушек индуктивности

| Способ намотки и материал каркаса | $\alpha L$, *град*$^{-1}$ | $Q$ | $C_0$, *пф* | Область применения |
|---|---|---|---|---|
| Катушка с осажденной намоткой на керамическом каркасе | $(10 \div 20) \cdot 10^{-6}$ | 80—150 | 0,5—2,0 | Генераторы и гетеродины КВ и УКВ высокой стабильности |
| Катушка с горячей намоткой на керамическом каркасе | $(10 \div 30) \cdot 10^{-6}$ | 100—400 | 0,5—2,0 | То же |
| Катушка с холодной тугой намоткой на керамическом каркасе | $(40 \div 100) \cdot 10^{-6}$ | 100—400 | 0,5—2,0 | Генераторы и гетеродины КВ и УКВ пониженной стабильности |
| Катушка с бескаркасной намоткой | $(50 \div 150) \cdot 10^{-6}$ | 100—600 | 0,5—2,0 | Усилительные каскады УКВ |
| Катушка с однослойной сплошной намоткой и каркасом из органического диэлектрика | $(100 \div 200) \cdot 10^{-6}$ | 80—200 | 3—5 | Генераторы и гетеродины низкой стабильности, усилительные каскады СВ и КВ |
| Катушка с намоткой типа „универсаль" | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 50—100 | 5—10 | Гетеродины низкой стабильности и усилительные каскады ДВ и СВ |
| Катушка с перекрестной универсальной намоткой | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 30—50 | 15—30 | То же |
| Катушка с секционированной намоткой (3—4 секции) | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 150—170 | 5—10 | „ „ |
| Катушка с несекционированной намоткой | | 20—30 | 10—50 | Дроссели высокой частоты |

Индуктивность цепи из двух длинных параллельных проводов круглого сечения

$$L = 4l\left(2,3\lg\frac{2D}{d} - \frac{D}{l}\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность, *мкгн;*

$D$ — расстояние между осями проводов, *см.*

На рис. 19 приведена зависимость индуктивности двухпроводной линии от отношения $D/d$. Кривая дает значения индуктивности, отнесенные к 1 *м* длины линии.

Индуктивность цепи из двух длинных проводов прямоугольного сечения

$$L = 4l\left(2,3\lg\frac{D}{a+b} - \frac{D}{l} + 0,223\frac{a+b}{l} + 1,5\right)\cdot 10^{-3},$$

где $D$ — расстояние между центрами сечений, *см*;

$a$ и $b$ — размеры сечения, *см.*

Индуктивность коаксиального кабеля

$$L = 2l\ln\frac{D}{d}10^{-3},$$

где $D$ — диаметр наружного провода, *см*;

$d$ — диаметр внутреннего провода, *см.*

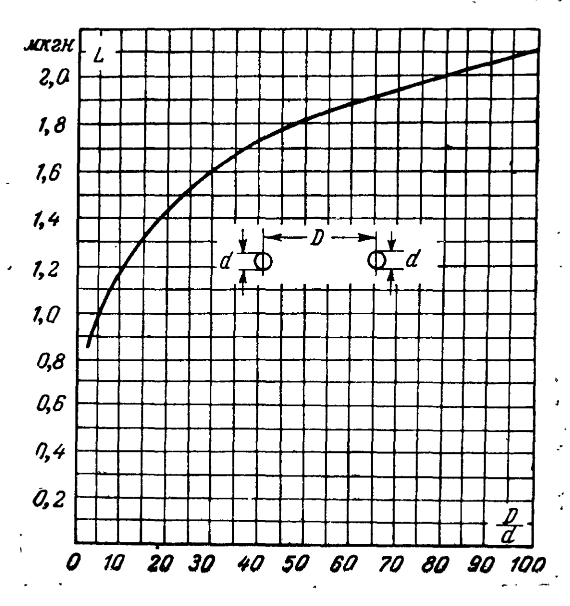



Рис. 19. Индуктивность отрезка двухпроводной линии длиной 1 *м.*

Индуктивность одиночного круглого витка из провода круглого сечения

$$L = 6,28D\left(2,3\lg\frac{8D}{d} - 2\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$D$ — диаметр витка, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Эта формула дает точные результаты для токов высокой частоты. Для токов низкой частоты лучшие результаты получаются при использовании формулы

$$L = 6,28D\left(2,3\lg\frac{8D}{d} - 1,5\right)\cdot 10^{-3}.$$

На рис. 20 показан график зависимости индуктивности круглого витка от диаметра витка $D$ и диаметра провода $d$. График составлен для высоких частот.

Индуктивность круглого витка из провода прямоугольного сечения (ленты)

$$L = 6,28D\left[2,3\left(1 + \frac{b^2}{8D^2}\right)\lg\frac{4D}{b} + \frac{b^2}{32D^2} - 0,5\right]\cdot 10^{-3},$$

где $b$ — ширина ленты, *см*.

При $D \gg b$ эта формула может быть упрощена:

$$L \approx 6,28D\left(2,3\lg\frac{4D}{b} - 0,5\right)\cdot 10^{-3}.$$

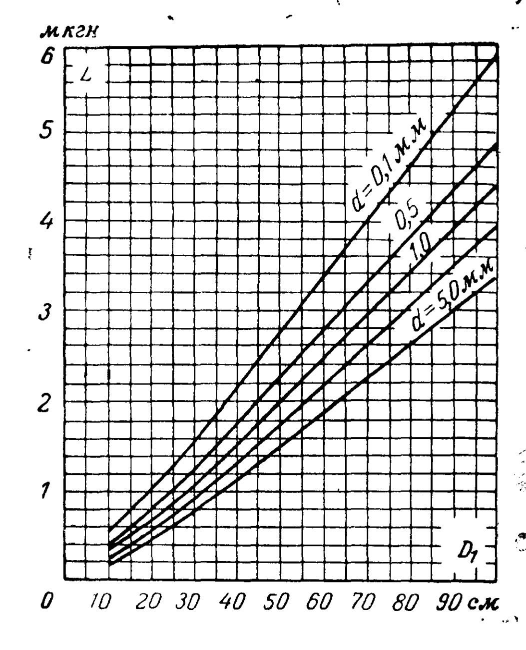



Рис. 20. Индуктивность круглого витка из провода круглого сечения.

Индуктивность прямоугольного витка из провода круглого сечения

$$L = \left\{9,2\left[(a+b)\lg\frac{4ab}{d} - a\lg(a+c) - b\lg(b+c)\right] + \right.$$
$$\left. + 8\left[c - a - b + \frac{d}{2}\right]\right\}\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$a$ и $b$ — длины сторон прямоугольника, *см*;
$c$ — его диагональ, равная $\sqrt{a^2+b^2}$, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Индуктивность квадратного витка из провода круглого сечения

$$L = 8a\left(2,3\lg\frac{2a}{d} + \frac{d}{2a} - 0,77\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$a$ — сторона квадрата, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Таблица 9

**Индуктивность квадратного витка**

| Сторона квадрата, *см* | Индуктивность, *мкгн* | | | Сторона квадрата, *см* | Индуктивность, *мкгн* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$=1 *мм* | $d$=2 *мм* | $d$=3 *мм* | | $d$=1 *мм* | $d$=2 *мм* | $d$=3 *мм* |
| 10 | 0,385 | 0,327 | 0,271 | 50 | 2,550 | 2,280 | 2,000 |
| 15 | 0,621 | 0,533 | 0,455 | 60 | 3,150 | 2,820 | 2,490 |
| 20 | 0,875 | 0,764 | 0,653 | 70 | 3,760 | 3,760 | 2,980 |
| 25 | 1,140 | 0,999 | 0,860 | 80 | 4,380 | 3,940 | 3,500 |
| 30 | 1,410 | 1,240 | 1,080 | 90 | 5,010 | 4,520 | 4,020 |
| 40 | 1,970 | 1,750 | 1,530 | 100 | 5,660 | 5,100 | 4,550 |

В табл. 9 приводятся значения индуктивности, вычисленные для различных размеров квадратного витка при разных диаметрах провода.

Для катушек с индуктивностью выше 15—20 *мкгн* применяется сплошная однорядная намотка. Целесообразность перехода на сплошную намотку определяется диаметром катушки. Ориентировочные значения индуктивности катушки заданного диаметра, при которых целесообразен переход на сплошную намотку, приведены в табл. 10.

Индуктивность однослойной катушки со сплошной намоткой, изготовленной на цилиндрическом каркасе, может быть рассчитана по следующим трем эмпирическим формулам:

$$L = \frac{D^2w^2}{1\,000l + 440D}; \quad L = \frac{0,02D^2w^2}{9D + 20l}; \quad L = \frac{0,01D^2w^2}{4D + 11l},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$D$ — диаметр катушки, *мм*,
$w$ — число витков;
$l$ — длина намотки, *мм*.

Первая и вторая формулы применимы для расчетов при $l>D/2$, а третья — при $l \leqslant D/2$.

Индуктивность однослойной катушки со сплошной намоткой можно определить по универсальной формуле, которая пригодна для расчетов при любых соотношениях конструктивных размеров катушки

$$L = \frac{0,01Dw^2}{\frac{l}{D} + 0,44},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$l$ — длина намотки, *см*;
$w$ — число внтков катушки.

Таблица 10

**Максимальная индуктивность для однослойной намотки**

| Диаметр каркаса, *мм* . . . | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|
| Максимальная индуктивность, *мкгн* . . . . . . . | 30 | 50 | 100 | 200 | 500 |

Диаметр катушки $D$ представляет собой диаметр окружности, образуемой осевой линией активного сечения провода. На высоких частотах можно с высокой точностью диаметр $D$ принять равным внутреннему диаметру витков, т. е. диаметру каркаса. Длина намотки $l$ представляет собой расстояние между осевыми линиями крайних витков.

На рис. 21 показана номограмма, позволяющая ускорить расчет величины индуктивности катушек по приведенной формуле.

Индуктивность катушек с сечением в форме многоугольника рассчитывается по формулам для цилиндрических катушек, при этом считается, что многоугольная катушка эквивалентна по индуктивности цилиндрической с равновеликим по площади круглым сечением.

Эквивалентный диаметр многоугольной катушки рассчитывается по формуле

$$D = D_0 \sqrt{\frac{N}{6,28} \sin \frac{6,28}{N}},$$

где $D_0$ — диаметр описаиной вокруг многоугольника окружности;
$N$ — число сторон многоугольника.

Индуктивность катушки, намотанной с шагом проводом круглого сечения, равна:

$$L = L' - 6,28wD(A+B) \cdot 10^{-3},$$

где $L'$ — индуктивиость катушки, найдениая без поправки на шаг, *мкгн*;
$A$ и $B$ — поправочные коэффициенты (рис. 22,*а*, *б*);
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$w$ — число витков.

Приведенный расчет дает достаточно точные результаты для катушек с числом витков не менее 4—5.

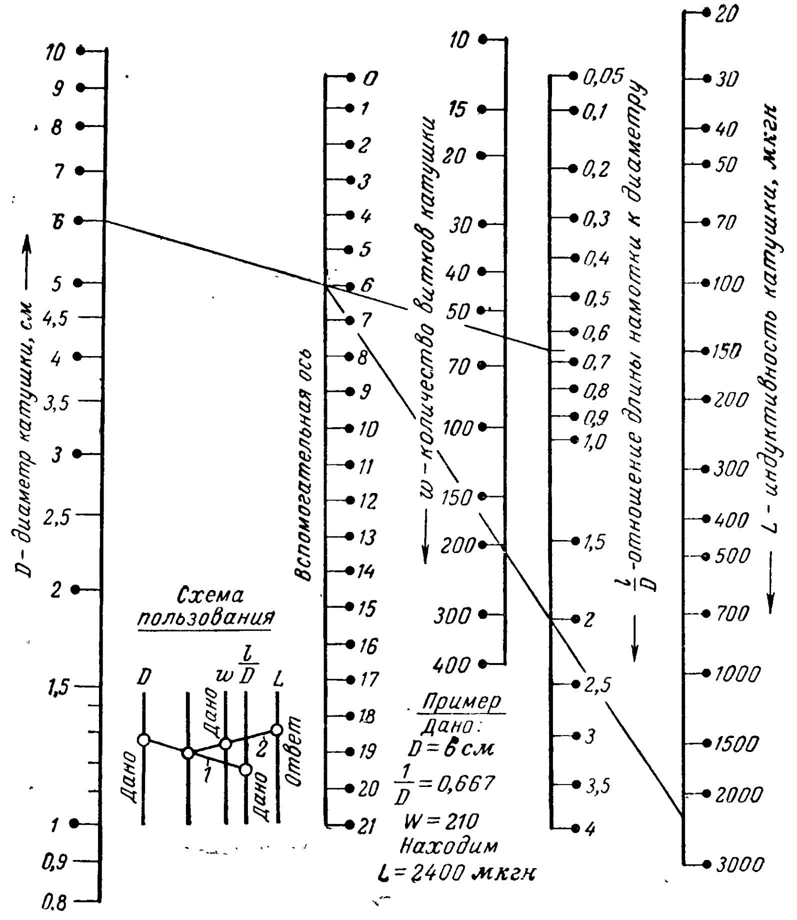



Рис. 21. Номограмма для расчета индуктивности однослойных катушек.

Индуктивность плоской катушки может быть приближенно определена по формулам для цилиндрической катушки с таким же числом витков и шагом намотки, имеющей диаметр, равный среднему диаметру плоской катушки.

Индуктивность плоской печатной катушки со спиральными витками (рис. 23,*а*) может быть определена с точностью 5% по формуле

$$L = 24{,}75 D_{ср} \sqrt[3]{w^5} \lg \frac{4D_{ср}}{t} 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

$D_{ср}$ — средний диаметр спирали, *см*;

$t$ — радиальная ширина намотки, *см*;

$w$ — число витков.

Для менее точного расчета можно воспользоваться следующей формулой:

$$L = r_1 w^2 k,$$

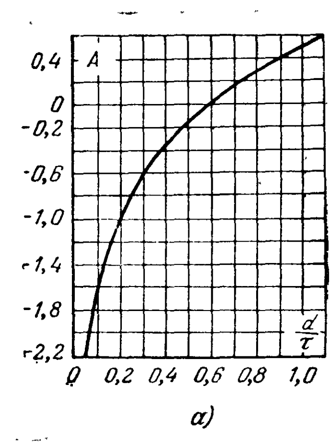
где $L$ — индуктивность, *мкгн*;

$r_1$ — радиус внешнего витка спирали, *см*;

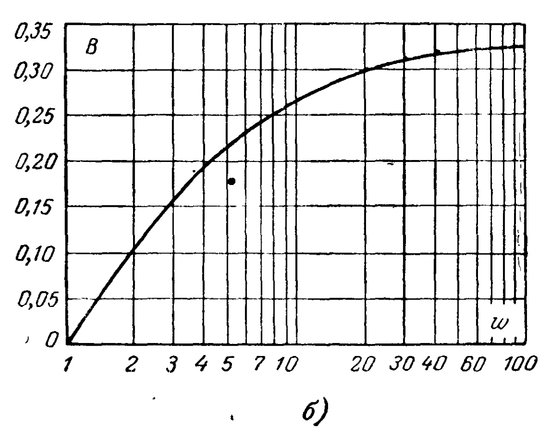
$w$ — число витков;

$k$ — коэффициент, зависящий от отношения радиусов витков спирали $r_1$ и $r_2$, определяемый по графику на рис. 24.

Практически $L_{макс} = 0,1$ *мгн*.




а)




б)

...с. 22. Значения поправочных коэффициентов $A$ и $B$.

Индуктивность плоской печатной катушки, витки которой расположены по сторонам квадрата (рис. 23,*б*), равна:

$$L = 55,5a \sqrt[3]{w^5} \lg \frac{8a}{t} 10^{-3},$$

где $a$ — длина средней стороны квадрата, *см*;
$t$ — радиальная ширина намотки.

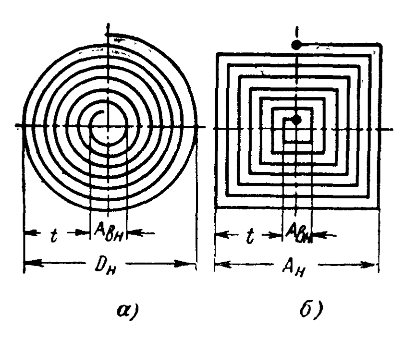



Рис. 23. Печатные спиральные катушки.

*а* — с круглыми витками; *б* — с квадратными витками.

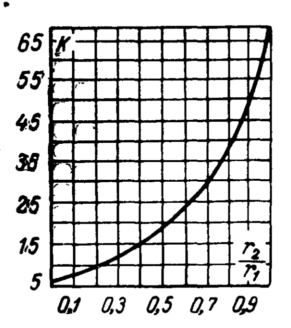



Рис. 24. График значений коэффициента *k*.

Из рис. 23 очевидно, что

$$D_{ср} = 0,5(D_н + D_{вн});\ t = 0,5(D_н - D_{вн})$$

или

$$t = 0,5(A_н - A_{вн}).$$

## Многослойные катушки

Многослойные катушки применяются при индуктивности выше 200—500 *мкгн*. Многослойные катушки могут быть разделены на простые и сложные. К простым намоткам относится рядовая многослойная намотка, при которой витки укладываются на каркас правильными рядами, и намотка «внавал», при которой нет определенной закономерности в расположении витков и слоев.

Широкое распространение получили сложные многослойные намотки. Одной из распространенных сложных намоток является универсальная, при которой витки не располагаются параллельно друг другу, а идут попеременно от одного края к другому, пересекаясь под некоторым углом.

Размеры многослойной катушки определяются величиной наружного диаметра $D$, внутреннего $D_0$ и длиной намотки $l$ (рис. 25).

Радиальную глубину намотки $t$ можно принять равной

$$t = \frac{D - D_0}{2}.$$

Средний диаметр катушки

$$D_{\text{ср}}=0{,}5(D_0+D).$$

Для простой рядовой многослойной намотки и намотки «внавал» радиальная глубина намотки равна:

$$t=\frac{\alpha d_0^2 w}{l},$$

где $\alpha$ — коэффициент неплотности, значения которого приведены в табл. 11;

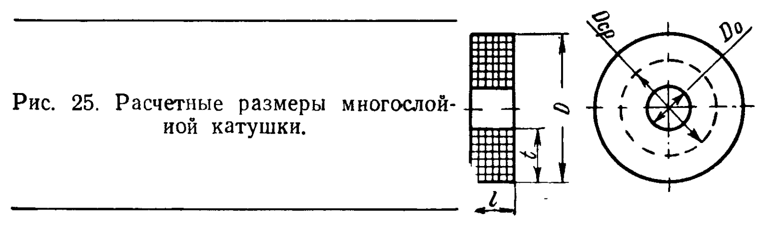



Рис. 25. Расчетные размеры многослойиой катушки.

$d_0$ — диаметр провода с изоляцией, *мм*;
$l$ — длина намотки, *мм*;
$w$ — число витков катушки.

Таблица 11

**Значения коэффициента неплотности $\alpha$**

| Диаметр провода без изоляции, *мм* | 0,08—0,11 | 0,15—0,25 | 0,35—0,41 | 0,51—0,93 | Свыше 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 1,3 | 1,25 | 1,2 | 1,1 | 1,05 |

Индуктивность многослойной катушки может быть рассчитана по формуле

$$L=\frac{0{,}08D_{\text{ср}}^2 w}{3D_{\text{ср}}+9l+10t},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$D_{\text{ср}}$ — средний диаметр намотки, *см*;
$l$ — длина намотки, *см*;
$t$ — радиальная глубина намотки, *см*.

На рис. 26 приведена номограмма для расчета величины индуктивности многослойных катушек.

Индуктивность многослойной катушки можно определить по следующей упрощенной формуле:

$$L=L_0 w^2 D\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$L_0$ — поправочный коэффициент.

Величина коэффициента $L_0$ зависит от отношения длины намотки к среднему диаметру катушки $l/D_{ср}$ и от отношения толщины катушки к среднему диаметру $t/D_{ср}$. Значения коэффициента $L_0$ для многослойных катушек приведены на рис. 27,*а—в*.

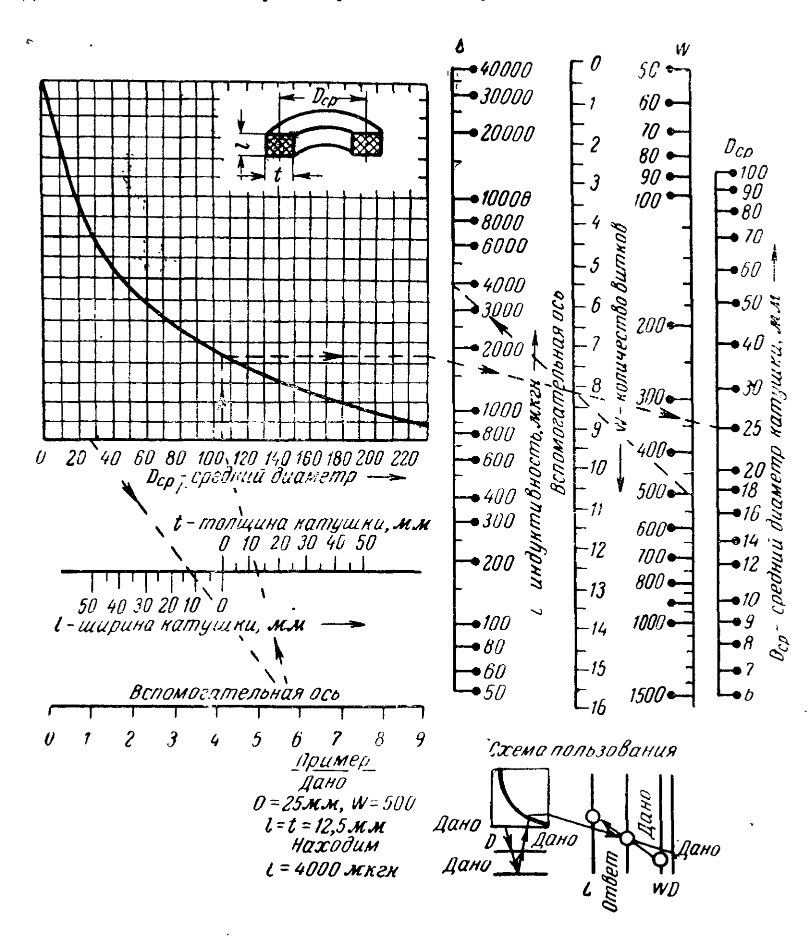



Рис. 26. Номограмма для расчета индуктивности многослойных катушек.

На рис. 28 показана секционированная катушка индуктивности, характеризующаяся достаточно высокой добротностью. Каждая секция этой катушки представляет собой обычную многослойную катушку с небольшим числом витков. Число секций может быть от двух до восьми.

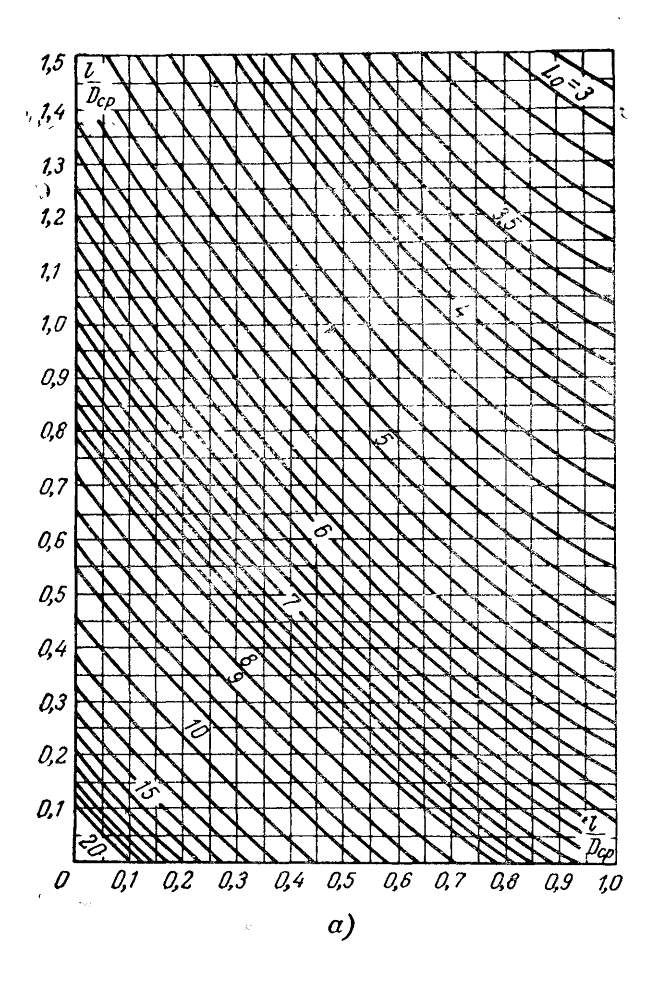
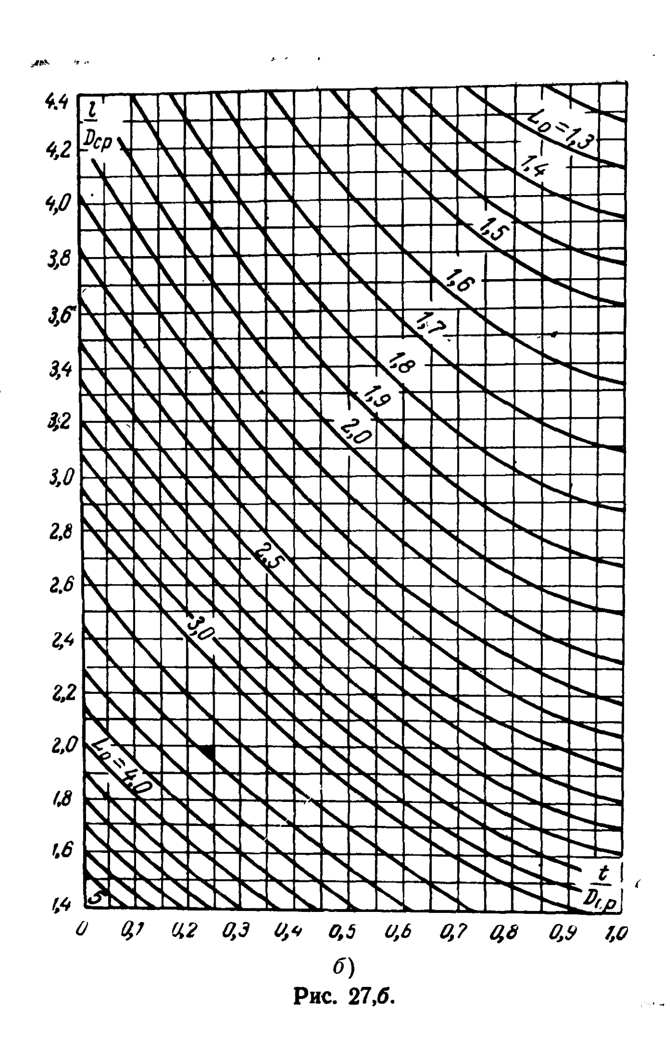



Рис. 27,*а*. График значений $L_0$ для многослойных катушек.



$\frac{l}{D_{cp}}$
4,4
4,2
4,0
3,8
3,6
3,4
3,2
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
$L_0=1,3$
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,5
3,0
$L_0=4,0$
5
$\frac{t}{D_{cp}}$
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0


*б*)

**Рис. 27,б.**

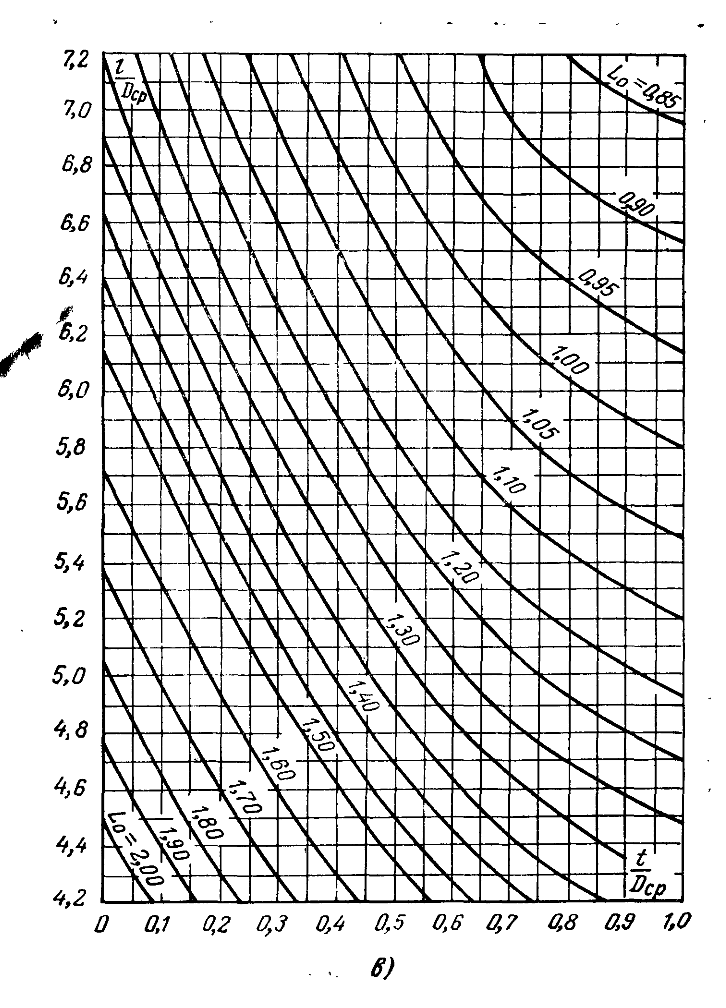



Рис. 27,*в*.

Индуктивность секционированной катушки, состоящей из $n$ секций, рассчитывается по формуле

$$L = L_c\,[n + 2k\,(n - 1)],$$

где $L_c$ — индуктивность секции;

$k$ — коэффициент связи между секциями.

Коэффициент $k$ зависит от размеров секций и расстояния между ними. Эта зависимость представлена графически на рис. 29.

Отношение $b/D_{ср}$ выбирается в таких пределах, чтобы величина $k$ была равна 0,2—0,4. Расчет каждой секции производится обычным способом.

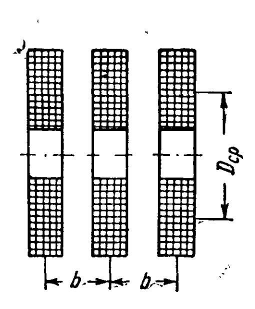



Рис. 28. Секционированная катушка индуктивности.

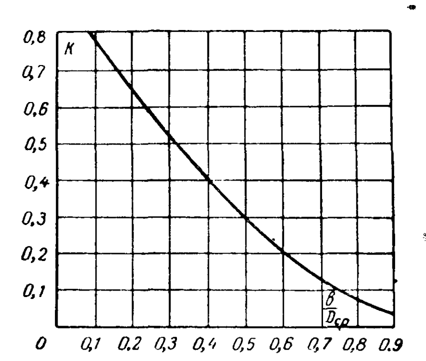



Рис. 29. График значений коэффициента связи $k$ для секционированных катушек.

## Экранированные катушки

При помещении катушки в металлический экран взаимная индуктивность между витками катушки и короткозамкнутыми цепями, образованными экраном, приводит к уменьшению величины индуктивности катушки. Кроме того, увеличиваются собственная емкость и сопротивление катушки.

Уменьшение индуктивности катушки при помещении ее в экран (рис. 30) может быть рассчитано по формуле

$$L_э = L_0 \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_э}\right)^3\right] \left[1 - \left(\frac{l_0}{2l_э}\right)^2\right],$$

где $L_э$ — индуктивность экранированной катушки;

$L_0$ — индуктивность катушки без экрана;

$D_0/D_э$ — отношение диаметра обмотки к диаметру экрана;

$l_0/2l_э$ — отношение длины намотки к удвоенной длине экрана.

Размеры на рис. 30 должны быть выражены в сантиметрах.

На рис. 31 приведена связь между уменьшением индуктивности катушки при помещении ее в экран и относительной величиной диаметра экрана.

Индуктивность экранированной катушки может быть рассчитана по следующей формуле:

$$L_э = L_0(1 - k^2),$$

где $L_0$ — индуктивность катушки без экрана;

$k$ — коэффициент связи между катушкой и экраном.

При однослойных и тонких многослойных катушках коэффи-

циент связи $k$ рассчитывается по формуле

$$k=\sqrt{\eta\left(\frac{D_0}{D_э}\right)^3},$$

где $D_0$ — диаметр катушки;

$D_э$ — диаметр экрана;

$\eta$ — коэффициент, зависящий от отношения $l/D_0$ катушки, значения которого приведены на рис. 32.

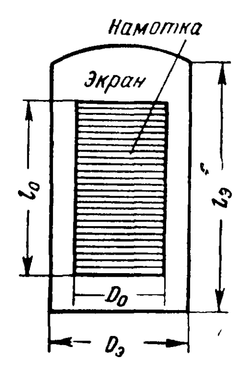



Рис. 30. Экранированная катушка.

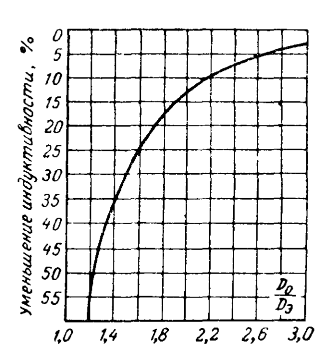



Рис. 31. График изменения индуктивности катушки в зависимости от размеров экрана.

На рис. 33 показан график для приближенного расчета величины индуктивности экранированных однослойных и тонких многослойных катушек. График представляет зависимость отношения индуктивности экранированной катушки к индуктивности катушки без экрана от соотношения геометрических размеров катушки и экрана.

Влияние экрана на параметры катушки проявляется тем сильнее, чем ближе его стенки расположены к обмотке. Для того чтобы индуктивность и добротность катушки падали не более чем на 10%, рекомендуются следующие соотношения между диаметрами экрана и катушки: для однослойных катушек $D_э/D_0=1{,}6\div2{,}5$, причем для коротких катушек $D_э/D_0=1{,}5\div1{,}8$. Для катушек с повышенной стабильностью $D_э/D_0\geqslant2{,}5$.

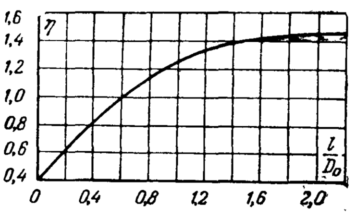



Рис. 32. График значений коэффициента $\eta$.

Экраны выполняются в виде круглых или прямоугольных стаканов из алюминия, меди или латуни. Толщина стенок экрана зависит от материала экрана и частоты, при которой работает катушка. Могут быть рекомендованы следующие толщины стенок экрана в миллиметрах.

| Частота, *Мгц* | Из меди | Из алюминия |
|---|---|---|
| 0,1 | 0,98 | 1,30 |
| 1,0 | 0,31 | 0,40 |
| 10,0 | 0,10 | 0,13 |
| 100,0 | 0,03 | 0,04 |

Экранировать следует катушки большого размера, диаметр которых не менее 15—25 *мм*. Катушки диаметром 4—5 *мм*, удаленные от других деталей на расстояния в 4—5 раз бо́льшие их диаметра, обычно в экранировании не нуждаются, так как они создают поле в относительно небольшом пространстве.

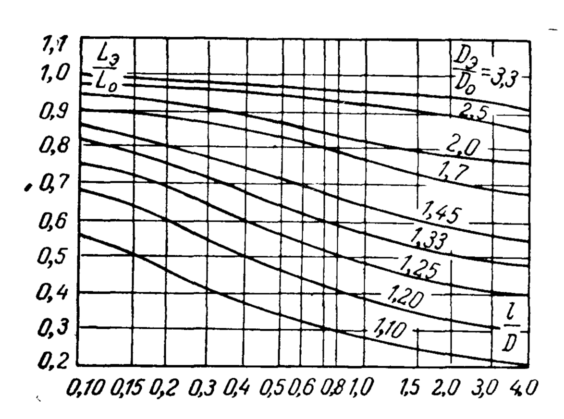



Рис. 33. График для расчета индуктивности однослойных и тонких многослойных экранированных катушек.

## Собственная емкость катушек индуктивности

Между витками в катушке индуктивности, помимо магнитного, существует также электрическое поле, которое влияет на собственную емкость катушки. Собственная емкость изменяет параметры катушек, понижает добротность и стабильность. Частота, на которую оказывается настроенным контур, состоящий из индуктивности и собственной емкости, называется собственной частотой катушки.

Величина собственнной емкости определяется типом намотки и размерами катушки. Наименьшей собственной емкостью (1—2 *пф*) обладают однослойные катушки, намотанные с шагом. Из числа многослойных катушек наименьшей собственной емкостью обладают секционированные катушки. Это объясняется тем, что собственные емкости каждой секции соединяются между собой последовательно и результирующая емкость уменьшается.

Собственная емкость катушки, у которой длина намотки не больше диаметра намотки, определяется по формуле

$$C_0 \approx \frac{6,28D}{3,6 \operatorname{arccos} h \frac{\tau}{d}}.$$

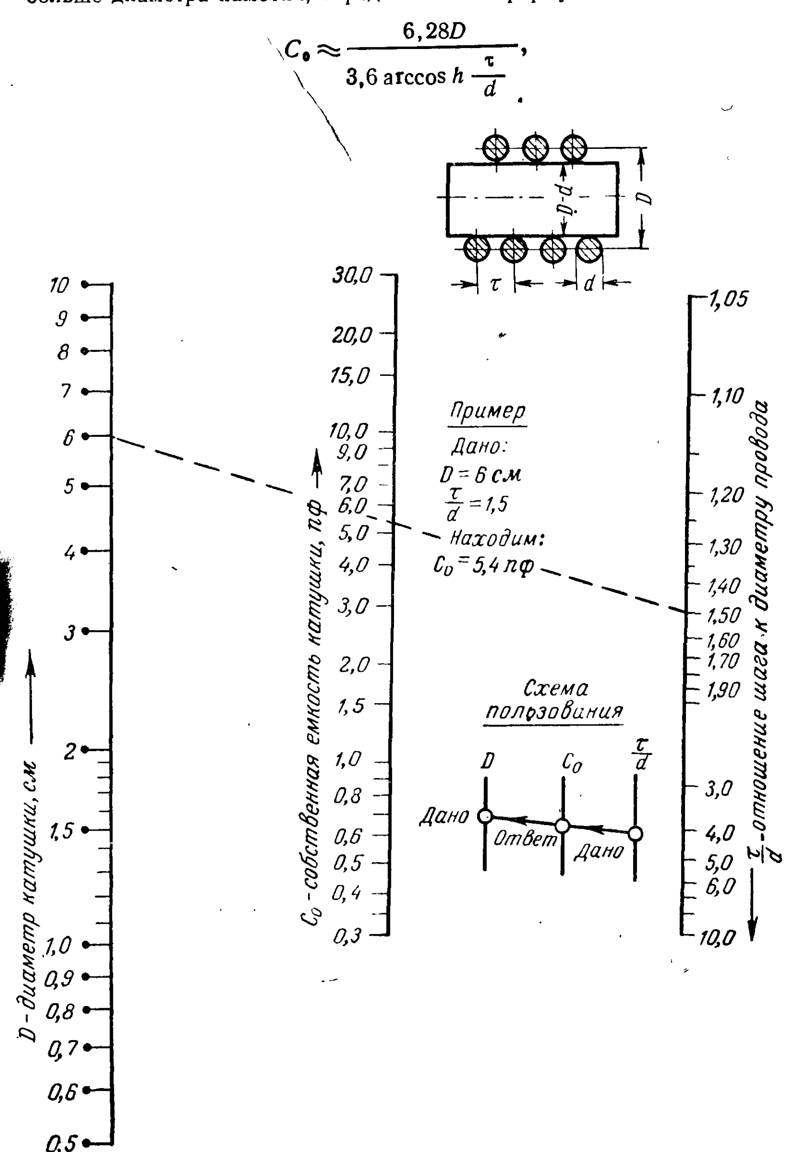



Рис. 34. Номограмма для расчета собственной емкости однослойных катушек, намотанных с принудительным шагом.

где $C_0$ — собственная емкость катушки, *пф*;

$D$ — диаметр намотки, *см*;

$\tau$ — шаг намотки, *см*;

$d$ — диаметр провода, *см*.

На рис. 34 показана номограмма для определения собственной емкости однослойных катушек, намотанных с шагом. Собственную

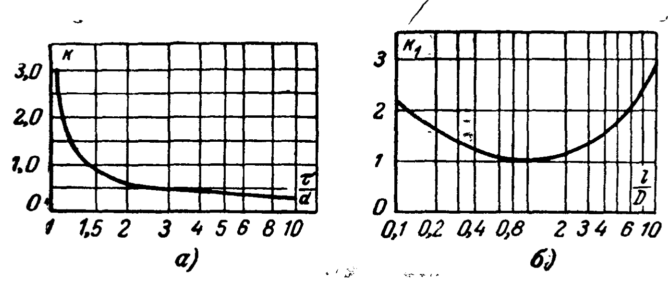



Рис. 35. Графики значений коэффициентов $k$ и $k_1$ для расчета собственной емкости однослойных катушек.

емкость катушки, намотанной с большим шагом, можно принять равной

$$C_0 \approx 0{,}5D;$$

для катушки, намотанной виток к витку,

$$C_0 \approx 1{,}5D.$$

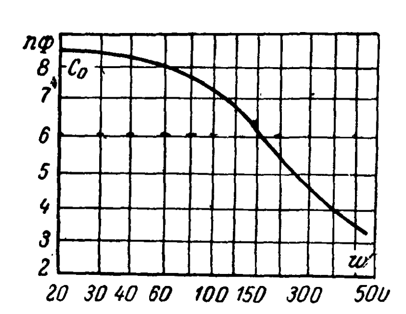



Рис. 36. График зависимости собственной емкости универсальных катушек от числа витков.
$D=10 \div 20$ *мм*; $l=2 \div 6$ *мм*; $t=1 \div 8$ *мм*.

Расчет величины собственной емкости однослойных катушек можно производить по следующей формуле:

$$C_0 \approx kk_1D,$$

где $D$ — диаметр катушки, *см*;

$k$ — коэффициент, зависящий от соотношения между шагом намотки и диаметром провода (рис. 35,*а*);

$k_1$ — коэффициент, зависящий от соотношения между длиной и диаметром катушки (рис. 35,*б*).

Собственная емкость секционированной катушки при расстояниях между секциями, примерно равных длине намотки, равна:

$$C_0 = C_c \frac{0,33n + 0,67}{n},$$

где $C_c$ — собственная емкость отдельной секции, *пф*;
$n$ — число секций.

На рис. 36 показан график зависимости собственной емкости универсальных катушек от числа витков.

## Взаимная индуктивность и коэффициент связи

Для обеспечения магнитной связи между катушками их располагают так, чтобы оси катушек были параллельны, совпадали или пересекались под острым углом. Если оси двух катушек индуктивности пересекаются под прямым углом, то магнитная связь между ними практически отсутствует. На рис. 37 показаны некоторые варианты взаимного расположения катушек индуктивности.

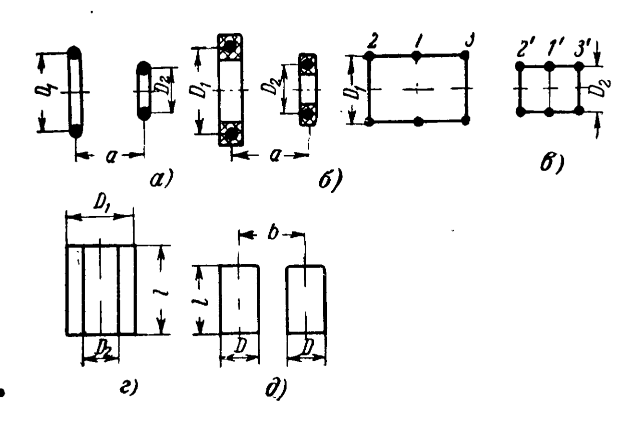



Рис. 37. К расчету взаимной индуктивности между катушками.

Взаимная индуктивность между смежными коаксиальными витками (рис. 37,*а*) равна:

$$M \approx D_1 \varphi \cdot 10^{-3},$$

где $M$ — взаимная индуктивность, *мкгн*;
$D_1$ — диаметр большего витка, *см*;
$\varphi$ — коэффициент, зависящий от соотношения размеров витков и расстояния между ними (рис. 38,*а—в*).

Взаимная индуктивность между смежными коаксиальными катушками с квадратным или близким к нему сечением (рис. 37,*б*) равна:

$$M = w_1 w_2 M_0,$$

где $w_1$ и $w_2$ — числа витков катушек;

$M_0$ — взаимная индуктивность между центральными витками, определяемая по формуле для рис. 37,*а*.

Взаимная индуктивность между длинными однослойными катушками, расположенными близко друг к другу (рис. 37,*в*), равна:

$$M = w_1 w_2 D_1 \varphi_0 \cdot 10^{-3},$$

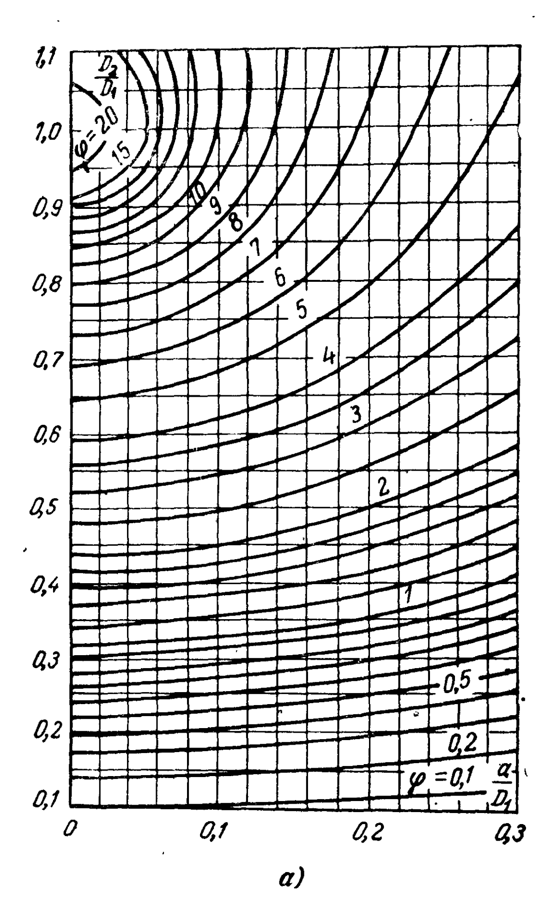
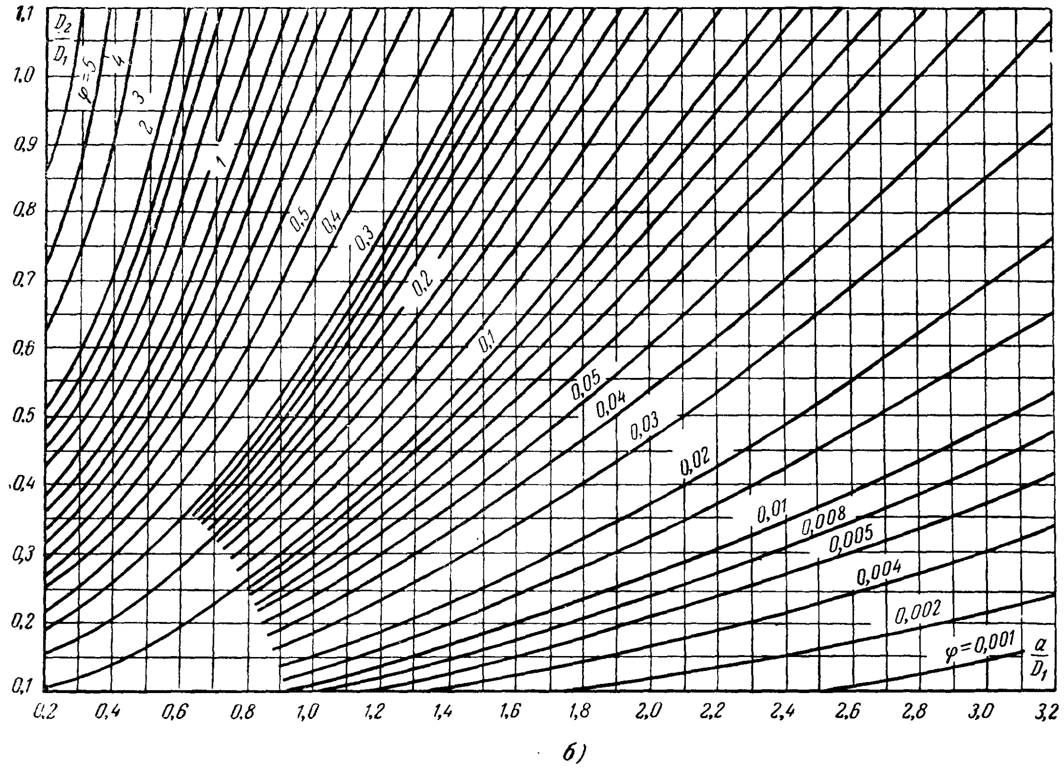


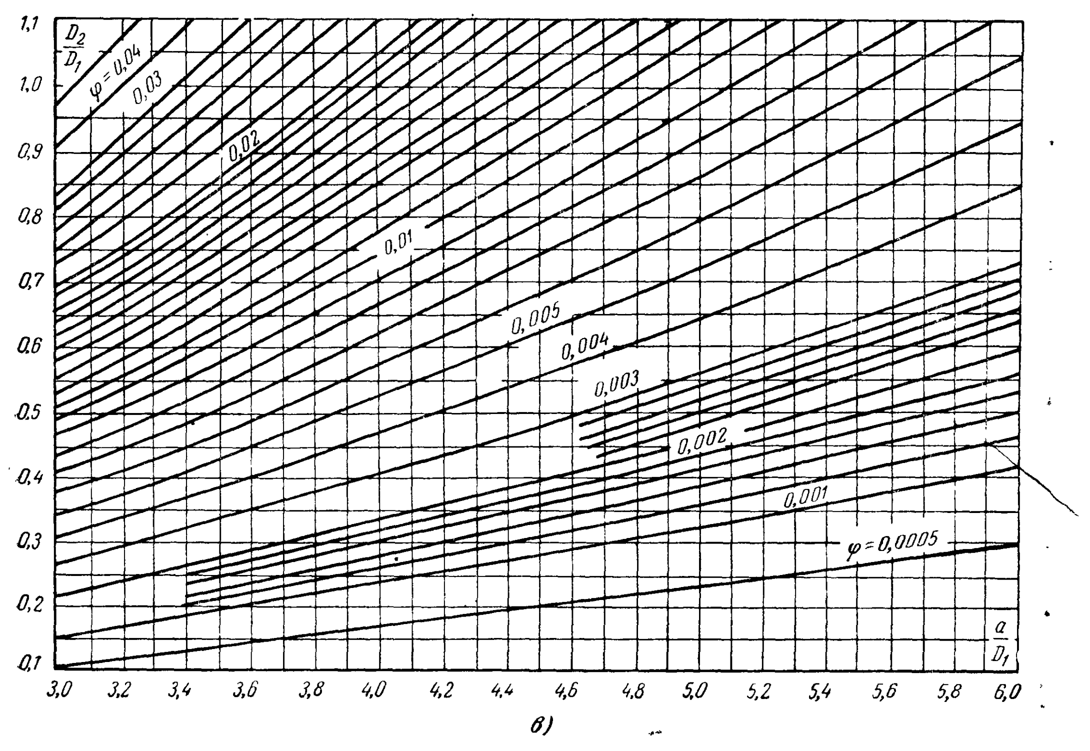

Рис. 38,*а*. График значений коэффициента φ.




б)

Рис. 38,б.

4—2585



$\frac{D_2}{D_1}$
$\varphi = 0,04$
0,03
0,02
0,01
0,005
0,004
0,003
0,002
0,001
$\varphi = 0,0005$
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
3,0
3,2
3,4
3,6
3,8
4,0
4,2
4,4
4,6
4,8
5,0
5,2
5,4
5,6
5,8
6,0
$\frac{a}{D_1}$


*в)*

Рис. 38,*в*.

где

$$\varphi_0 = \frac{1}{6}(2\varphi_{11'} + \varphi_{12'} + \varphi_{13'} + \varphi_{1'2} + \varphi_{1'3})$$

есть среднее арифметическое значение $\varphi$.

Взаимная индуктивность между однослойными катушками одинаковой длины, расположенными одна внутри другой (рис. 37,*г*), равна:

$$M = w_1 w_2 \psi \sqrt{D_1 D_2} \cdot 10^{-8},$$

где $\psi$ — коэффициент, определяемый из графика на рис. 39.

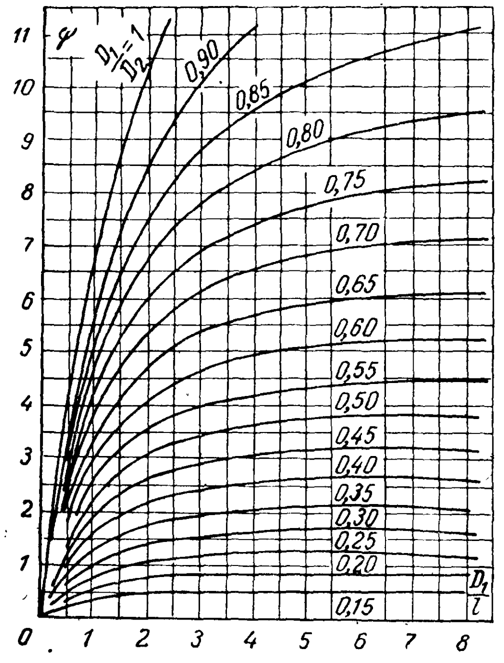



Рис. 39. График значений коэффициента $\psi$.

Взаимная индуктивность между катушками одинакового размера, оси которых параллельны (рис. 37,*д*), равна:

$$M = \frac{0,6 w_1 w_2 D^4}{b^3} \cdot 10^{-8}.$$

Взаимная индуктивность между обмотками, расположенными одна над другой, на общем тороидальном сердечнике равна:

$$M = \frac{12,56 w_1 w_2 S_{\text{т}}}{l_{\text{ср}}},$$

где $S_{\text{т}}$ — сечение тороидального сердечника, *см*²;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина осевой линии сердечника, *см*.

Коэффициент связи между катушками определяется размерами катушек и расстоянием между ними и не зависит от числа витков и типа намотки. Коэффициент связи равен:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где $M$ — взаимная индуктивность;

$L_1$ и $L_2$ — индуктивности катушек.

Следует отметить, что величина $k$ всегда меньше единицы.

## Добротность катушек индуктивности

Качество катушки характеризуется отношением ее индуктивного сопротивления к активному при заданной частоте $\omega$ и индуктивности $L$. Это соотношение

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{X_L}{R}$$

называется добротностью катушки индуктивности.

Индуктивное сопротивление, оказываемое катушкой переменному току, можно рассчитать по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi f L,$$

где $X_L$ — индуктивное сопротивление, *ом*;

$f$ — частота, *гц*;

$L$ — индуктивность катушки, *гн*.

Для тока с частотой 50 *гц* эта формула имеет вид:

$$X_L = 314L,$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*.

Таблица 12

**Индуктивные сопротивления катушек на высокой частоте (в омах)**

| Индуктивность, *мкгн* | Частота | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 *Мгц* | 3 *Мгц* | 1,2 *Мгц* | 600 *кгц* | 200 *кгц* | 30 *кгц* |
| 25 | 1 570 | 470 | 190 | 95 | 31,4 | 4,7 |
| 50 | 3 140 | 940 | 380 | 190 | 62,8 | 9,4 |
| 100 | 6 300 | 1 890 | 760 | 380 | 125 | 18,9 |
| 200 | 12 560 | 3 770 | 1 500 | 760 | 250 | 38,0 |
| 500 | 31 400 | 9 400 | 3 800 | 1 900 | 628 | 94,0 |
| 1 000 | 63 000 | 18 900 | 7 600 | 3 800 | 1 260 | 189 |
| 5 000 | 314 000 | 94 000 | 38 000 | 19 000 | 6 280 | 940 |
| 25 000 | 1 570 000 | 470 000 | 189 000 | 94 200 | 31 400 | 4 700 |
| 100 000 | 6 300 000 | 1 890 000 | 756 000 | 378 000 | 126 000 | 18 900 |

В табл. 12 приведены значения индуктивных сопротивлений для различных величин индуктивностей как для низких, так и высоких частот. На рис. 40 показана номограмма для определения индуктивных сопротивлений катушек индуктивности.

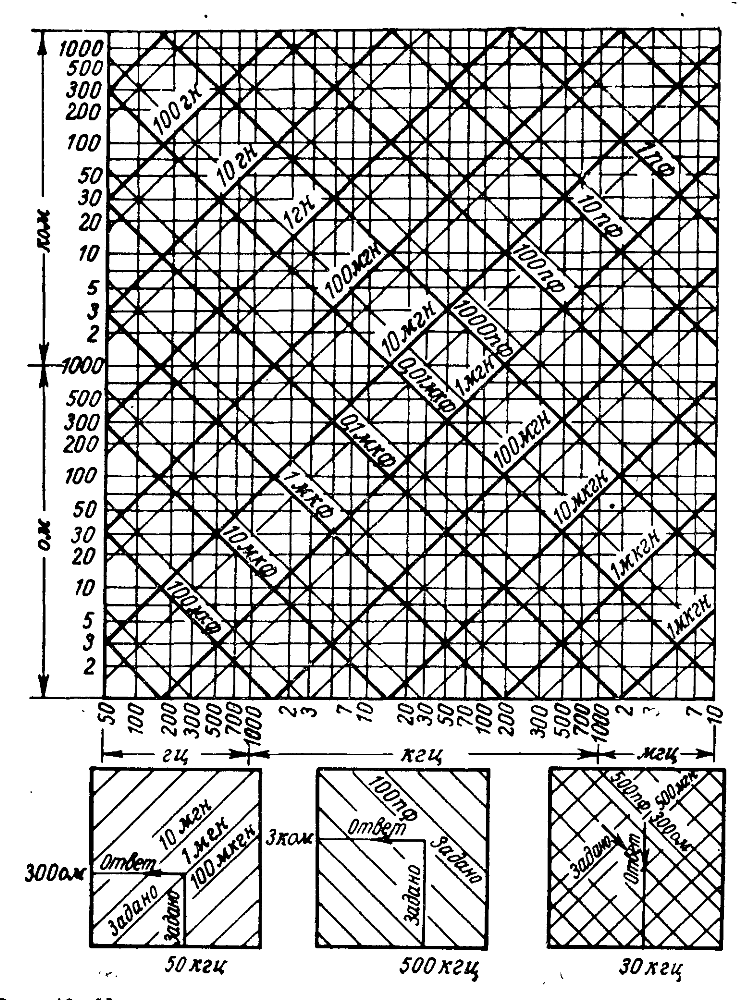



Рис. 40. Номограмма для расчета индуктивного сопротивления катушек.

Активное сопротивление катушки $R$ складывается из сопротивления провода токам высокой частоты, сопротивления вносимого диэлектрическими потерями в каркасе, сопротивления вносимого собственной емкостью катушки и др.

Таблица 12,а

**Индуктивные сопротивления катушек на низкой частоте (в омах)**

| Индуктивность, *гн* | Частота, *гц* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 250 | 1 000 | 2 500 | 5 000 | 10 000 |
| 0,1 | 31 | 157 | 682 | 1 570 | 3 140 | 6 280 |
| 0,25 | 78 | 390 | 1 570 | 9 900 | 7 850 | 15 700 |
| 1,0 | 314 | 1 570 | 6 280 | 15 700 | 31 400 | 62 800 |
| 5,0 | 1 570 | 7 850 | 31 400 | 78 500 | 157 000 | 314 000 |
| 25,0 | 7 850 | 39 000 | 157 000 | 390 000 | 785 000 | 1 510 000 |
| 100,0 | 31 400 | 157 000 | 638 000 | 1 570 000 | 3 140 000 | 6 280 000 |

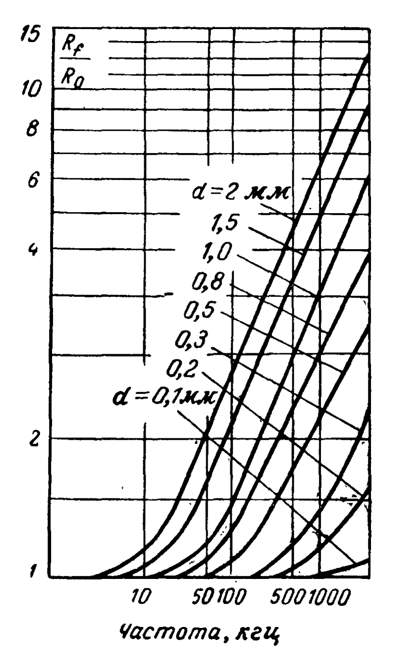



Рис. 41. График зависимости сопротивления медного провода от частоты.

Величина полного активного сопротивления катушки может колебаться в широких пределах. Для катушек средневолнового диапазона, имеющих индуктивность около 200 *мкгн*, полное активное сопротивление лежит в пределах от 3 до 50 *ом*. Длинноволновые катушки, имеющие индуктивность около 2 000 *мкгн*, обладают сопротивлением от 15 до 150 *ом*.

Переменное магнитное поле вызывает внутри проводника противо-э. д. с., приводящие к неравномерному распределению тока по поперечному сечению проводника. Кроме того, в проводнике возбуждаются вихревые токи и происходит потеря мощности. В результате этого ток по сечению проводника сосредоточивается главным образом в поверхностных слоях. Неравномерное распределение тока уменьшает действующее сечение проводника и тем самым увеличивает его сопротивление. Сопротивление провода току высокой частоты может быть в несколько раз выше его сопротивления постоянному току. На рис. 41 показана зависимость увеличения сопротивления медных проводов от частоты.

Сопротивление одного погонного сантиметра медного провода круглого сечения току высокой частоты равно:

$$R_f = 83{,}2\,\frac{\sqrt{f}}{d}\,10^{-6},$$

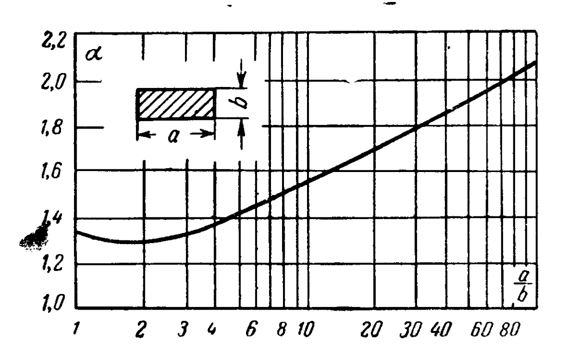



Рис. 42. График значений коэффициента α.

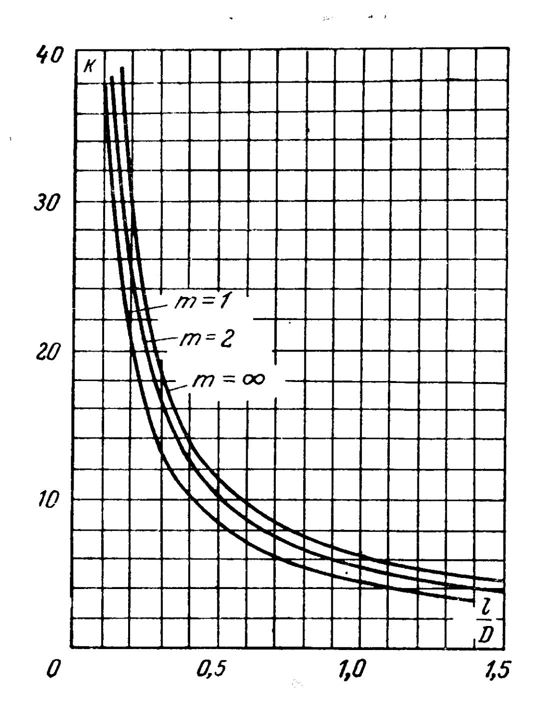



Рис. 43. График значений коэффициента $k$ для расчета сопротивления однослойных и тонких многослойных катушек ($m$ — число слоев).

где $f$ — частота, *Мгц*;

$d$ — диаметр провода, *см*.

Сопротивление провода прямоугольного сечения

$$R_f = \frac{1,3\alpha\sqrt{f}}{a+b}10^{-4},$$

где $f$ — частота, *Мгц*;

$\alpha$ — поправочный коэффициент, значения которого приведены на рис. 42;

$a$ и $b$ — размеры сечения провода, *см*.

Сопротивление провода катушки току высокой частоты как при однослойной, так и при многослойной намотках при частотах до 10 *Мгц* равно:

$$R_f = R_0\left[F + \left(\frac{kwd}{2D}\right)^2 G\right],$$

где $R_0$ — сопротивление провода постоянному току, *ом*;

$d$ — диаметр провода без изоляции, *см*;

$w$ — число витков катушки;

$D$ — диаметр однослойной катушки или наружный диаметр многослойной катушки, *см*;

$k$ — поправочный коэффициент.

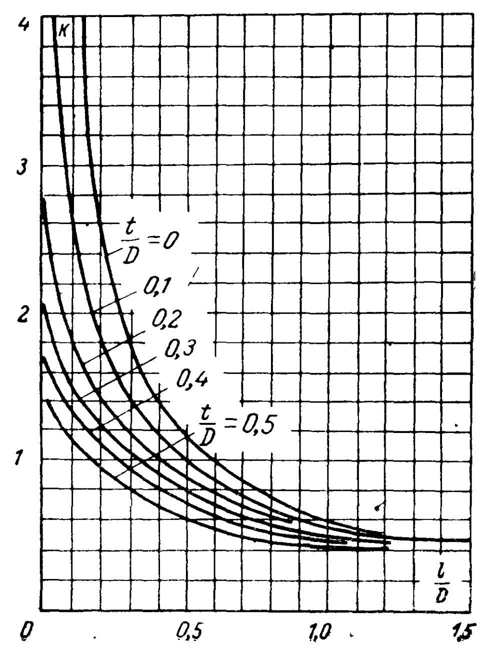



Рис. 44. График значений коэффициента $k$ для расчета сопротивления многослойных катушек.

Значения коэффициента $k$ для однослойных и тонких многослойных с небольшим числом витков катушек показаны на рис. 43, а для обычных многослойных — на рис. 44.

Коэффициент $F$ определяет сопротивление с учетом поверхностного эффекта, а коэффициент $G$ учитывает потери на вихревые токи. При увеличении диаметр провода его сопротивление токам высокой частоты из-за поверхностного эффекта будет уменьшаться, а из-за вихревых токов будет возрастать весьма значительно. При уменьшении диаметра провода произойдет обратное явление. Таким образом, существует некоторый диаметр провода на заданной частоте, называемый оптимальным, при котором $F$ и $G$ минимальны. Значения коэффициентов $F$ и $G$ для медного провода опти-

мального диаметра определяются по табл. 13 при помощи параметра

$$z = 0,106d\sqrt{f},$$

где $d$ — диаметр провода, *см*;
$f$ — частота, *гц*.

Таблица 13

**Значения коэффициентов $F$ и $G$**

| z | F | G | z | F | G |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 1,000 | — | 5,0 | 2,049 | 0,7550 |
| 0,5 | 1,000 | 0,00097 | 6,0 | 2,394 | 0,9316 |
| 0,8 | 1,002 | 0,00632 | 7,0 | 2,743 | 1,109 |
| 1,0 | 1,005 | 0,01519 | 8,0 | 3,094 | 1,287 |
| 1,3 | 1,015 | 0,0413 | 9,0 | 3,446 | 1,464 |
| 1,5 | 1,026 | 0,0681 | 10,0 | 3,799 | 1,641 |
| 1,8 | 1,052 | 0,1265 | 15,0 | 5,562 | 2,525 |
| 2,0 | 1,078 | 0,1724 | 20,0 | 7,328 | 3,409 |
| 2,3 | 1,131 | 0,2462 | 25,0 | 9,094 | 4,317 |
| 2,5 | 1,175 | 0,2949 | 30,0 | 10,86 | 5,177 |
| 2,8 | 1,256 | 0,3632 | 40,0 | 14,40 | 6,946 |
| 3,0 | 1,318 | 0,4049 | 50,0 | 17,93 | 8,173 |
| 3,5 | 1,442 | 0,4987 | 70,0 | 25,00 | 12,25 |
| 4,0 | 1,678 | 0,5842 | 90,0 | 32,07 | 15,78 |
| 4,5 | 1,863 | 0,6687 | 100,0 | 35,61 | 17,75 |

Расчет сопротивления катушек КВ и УКВ, намотанных с шагом, производится по формуле

$$R_f = \frac{0,525Dw\sqrt{f}}{d}\, 10^{-3},$$

где $R_f$ — сопротивление катушки, *ом*;
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*;
$f$ — частота, *Мгц*.

Сопротивление току высокой частоты катушек, намотанных литцендратом, равно:

$$R_f = R_0 \left\{F + \left[\frac{c}{d_0^2} + \left(\frac{kw}{2D}\right)^2\right] nd^2G\right\},$$

где $R_0$ — сопротивление катушки постоянному току, *ом*;
$d$ — диаметр отдельной жилы, *см*;
$n$ — число жил;
$d_0$ — полный наружный диаметр литцендрата, *см*;
$c$ — коэффициент, зависящий от числа жил, значения которого приведены в табл. 14.

Ориентировочно полный диаметр литцендрата рассчитывается по формуле

$$d_0 \approx 1,35d\sqrt{n}.$$

Как видно из приведенных формул, совместное действие эффекта вихревых токов и поверхностного эффекта приводит к значитель-

Таблица 14

Значения коэффициента $c$

| $n$ | 3,0 | 7,0 | 9,0 | 15 | 19 | 27 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $c$ | 1,55 | 1,817 | 1,84 | 1,88 | 1,90 | 1,92 | 2,0 |

ному увеличению активного сопротивления катушек. При совместном действии этих двух эффектов изменение сопротивления катушки в значительной мере подчиняется закону $\sqrt{f}$, так что сопротивление катушки $R_{f1}$ при частоте $f_1$ относится к ее сопротивлению $R_{f2}$ при частоте $f_2$ как

$$\frac{R_{f1}}{R_{f2}}=\sqrt{\frac{f_1}{f_2}}.$$

Добротность катушек индуктивности, определяемая совокупным действием ее индуктивности, активного сопротивления и собственной емкости, не будет линейно зависеть от частоты. Как правило, у всех катушек наблюдается при определенных частотах максимальное значение добротности, которое зависит от конструкции катушки.

Для повышения добротности катушек большое значение имеет выбор оптимального соотношения размеров. Для однослойных катушек рекомендуется выбирать отношение длины намотки к диаметру в пределах 0,7—1,0.

Для многослойных катушек рекомендуются следующие соотношения размеров:

$$\frac{l}{D}=0,2\div 0,5;\quad \frac{t}{D}=0,5\div 1,0.$$

Добротность катушек может быть повышена при использовании для их намотки литцендрата. В многожильном проводе уменьшаются потери на вихревые токи и на поверхностный эффект. Применение литцендрата оправдывается до частот 1—1,5 *Мгц*.

## Коротковолновые катушки

Коротковолновые катушки, как правило, выполняются однослойными и наматываются медным проводом.

Сопротивление этих катушек переменному току равно:

$$R_f=\frac{Dw\sqrt{f}}{380}\left(1-\frac{w^2d^2}{50l^2}\right),$$

где $D$ — диаметр намотки, *см*;
$w$ — число витков;
$f$ — частота, *Мгц*;
$d$ — диаметр провода, *мм*;
$l$ — длина намотки, *см*.

Если катушка используется при частотах, близких к собственной частоте катушки, то следует вносить поправку в действующее сопротивление обмотки

$$R_{f1} = \frac{R_f}{\left(1 - \frac{fLC_0}{25\,300}\right)^2},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$C_0$ — собственная емкость катушки, *пф*.

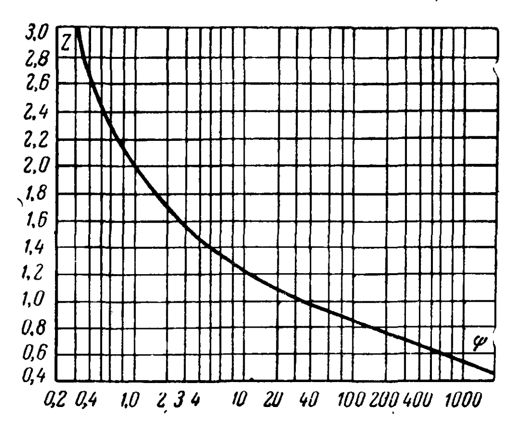



Рис. 45. График зависимости $z_{опт}$ от коэффициента ψ.

Индуктивность катушки при заданных размерах и числе витков

$$L = \frac{Dw^2}{102p + 45},$$

где $p$ — отношение длины намотки к диаметру катушки.

Сопротивление катушки при заданной форме намотки и индуктивности равно:

$$R_f = \frac{\sqrt{f}}{380d}\left[\sqrt{LD(102p+45)} + \frac{d^2\sqrt{L(102p+45)^3}}{50p^2\sqrt{D^5}}\right].$$

Расчет оптимального диаметра провода сводится к определению вспомогательного коэффициента

$$\psi = \left(\frac{kw}{2z'D}\right)^2,$$

где $k$—коэффициент, определяемый по графикам на рис. 43;

$$z' = 0{,}106\sqrt{f}.$$

При помощи коэффициента $\psi$ по графику на рис. 45 находят величину $z_{опт}$. Диаметр провода находится по формуле

$$d_{опт} = \frac{z_{опт}}{z'}.$$

При $\psi > 2\,000$

$$z_{опт} = \frac{2}{\sqrt[6]{2\psi}},$$

а при $\psi < 0,3$

$$z_{опт} = \sqrt{\frac{2}{\psi} + 0,71}.$$

Полученное значение оптимального диаметра округляется до ближайшего стандартного.

Оптимальный диаметр провода катушек, намотанных с шагом, зависит от шага намотки и размеров катушки. В случае круглого провода

$$d_{опт} = \frac{\tau}{k_1},$$

где $\tau$ — шаг намотки;

$k_1$ — коэффициент, значения которого приведены на рис. 46.

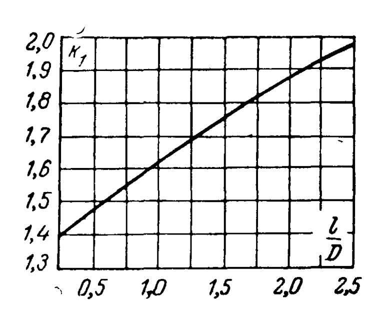



Рис. 46. График значений коэффициента $k_1$.

Рис. 47. График значений коэффициента $k_2$.

Сопротивление и добротность катушки, намотанной таким проводом, будут равны:

$$R_f = \frac{7,4w^2\sqrt{f}}{p} \cdot 10^{-4};$$

$$Q = 8,5DL_0p\sqrt{f}.$$

В случае плоского провода (ленты)

$$a_{опт} = \frac{\tau}{k_2},$$

где $a_{опт}$ — оптимальная ширина ленты;

$k_2$ — коэффициент, значения которого приведены на рис. 47.

Сопротивление катушки из такой ленты равно:

$$R_f = \frac{0{,}5w^2 \sqrt{f\rho}}{p},$$

а ее добротность

$$Q = 12{,}6DL_0 p \sqrt{\frac{f}{\rho}}\, 10^{-3},$$

где $\rho$ — удельное электросопротивление материала ленты.

Добротность катушки для любого диаметра провода равна:

$$Q = \frac{2\,400 \sqrt{f}\, Lp^2 dD}{w\left(l^2 + \frac{w^2 d^2}{50}\right)}.$$

Если, задавшись величиной индуктивности, формой намотки и диаметром провода, подбирать размеры катушки, то оптимальным диаметром обмотки явится:

$$D_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{Ld\,(102p + 45)}{10p^2}}.$$

Следует отметить, что при расчете по вышеприведенным формулам не учитываются потери в изоляции провода, материале каркаса и др. Поэтому фактические значения сопротивления и добротности отличаются от расчетных. Сопротивление катушки на высокой частоте больше расчетного, а добротность соответственно меньше.

## Катушки с магнитными сердечниками

Магнитные сердечники, введенные в катушку, увеличивают ее индуктивность. Кроме того, катушки с сердечниками имеют меньшее число витков при заданной индуктивности, большую добротность и незначительные размеры. Катушка с сердечником обладает более сосредоточнным магнитным полем, благодаря чему уменьшается магнитная связь между контурами в различных каскадах. Преимуществом таких катушек является возможность подстройки индуктивности путем перемещения сердечника внутри катушки. Магнитные сердечники для катушек изготовляют из магнитодиэлектриков и из ферритов.

Магнитодиэлектрики изготовляют из размельченного вещества, содержащего железо, отдельные частицы которого механически связаны между собой каким-либо диэлектриком. Диэлектрик осуществляет изоляцию частиц друг от друга и придает форму сердечнику. Наиболее известны магнитодиэлектрики из альсифера и карбонильного железа.

Альсифер отличается хорошими электрическими и магнитными показателями. Магнитодиэлектрики на основе альсифера имеют отрицательный температурный коэффициент магнитной проницаемости, что позволяет компенсировать положительный температурный коэффициент индуктивности катушек. Для применения на длинных волнах предназначен альсифер РЧ-9, на средних и коротких волнах — РЧ-6.

Карбонильное железо получается прессованием порошкообразного карбонильного железа с бакелитом, стиролом или аминопластом. Сердечники из карбонильного железа применяются на частотах до 30—50 *Мгц*. Карбонильное железо Р-2 предназначено для использования в катушках УКВ, а Р-8 — в катушках длинных и средних волн.

Ферриты представляют собой полупроводниковую керамику, получаемую путем прессования и обжига смеси из солей и окислов, в состав которых входит никель, марганец, литий, медь и др. Ферриты обладают высокой магнитной проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением, что обеспечивает малые потери на вихревые токи даже на очень высоких частотах.

На радиочастотах наиболее употребительны никель-цинковые (НЦ), марганцево-цинковые (МЦ), литий-цинковые (ЛЦ) и медно-цинковые (МЦ) ферриты. Марганцево-цинковые ферриты используются в основном на частотах до 100 *кгц*. Медно-цинковые и литий-цинковые ферриты обладают невысокой магнитной проницаемостью (100—200) и используются в основном на коротких волнах. Свинцово-никелевые ферриты применяются на КВ и УКВ, причем на КВ с проницаемостью 50—200, а на УКВ — с проницаемостью 5—25.

Свойства высокочастотных магнитных материалов характеризуются эффективной магнитной проницаемостью, диапазоном рабочих частот, потерями и стабильностью.

Эффективную магнитную проницаемость определяют, измеряя индуктивность катушки с сердечником $L_c$ и без него $L_0$, с последующим вычислением по формуле

$$\mu_{эфф} = \frac{L_c}{L_0}.$$

Для сердечников простых конфигураций, например цилиндрических, величина $\mu_{эфф}$ может быть рассчитана. а для более сложных конфигураций определяется только опытным путем.

Магнитный сердечник увеличивает полное сопротивление катушки, причем это увеличение происходит из-за потерь на гистерезис, вихревых токов, высокочастотных потерь в диэлектрике. Потери на гистерезис зависят от напряженности магнитного поля $H$, а потери на вихревые токи и в диэлектрике — от частоты. Общее сопротивление потерь $R_c$ определяется по тангенсу угла

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{R_c}{\omega L},$$

измеренному на катушке с тороидальным сердечником. Величина, обратная $\operatorname{tg} \delta_c$, называется добротностью сердечника, т. е.

$$Q_c = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_c}.$$

Диэлектрические потери в ферритах не поддаются точному расчету, но они оказывают влияние на общие потери. Так, для ферритов 600НН и 100НН величина $\operatorname{tg} \delta_д$ на частоте 0,5 *Мгц* составляет 0,35 и 0,31 соответственно. С повышением частоты диэлектрические потери уменьшаются.

Стабильность магнитных материалов характеризуется изменением проницаемости и потерь под влиянием температуры, влажности, а также изменением с течением времени. Под влиянием температуры

изменяется главным образом магнитная проницаемость. Температурную стабильность магнитных материалов принято характеризовать температурным коэффициентом магнитной проницаемости

$$ТК\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu\Delta t^{\circ}},$$

где $\Delta\mu$ — изменение магнитной проницаемости при изменении температуры на $\Delta t^{\circ}$.

## Катушки индуктивности с цилиндрическими магнитными сердечниками

К этому типу катушек относятся высокочастотные дроссели, катушки магнитных антенн, катушки фильтров промежуточной частоты и некоторые разновидности контурных катушек. Сердечники катушек изготовляют из карбонильного железа или феррита.

Сердечники из карбонильного железа (рис. 48) обозначаются СЦР (сердечники цилиндрические с резьбой), СЦГ (сердечники цилиндрические гладкие) и СЦТ (сердечники цилиндрические трубчатые). Основные данные цилиндрических карбонильных сердечников приведены в табл. 15.

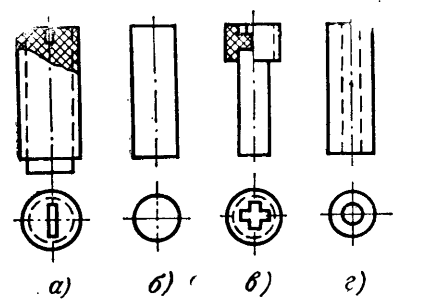


Рис. 48. Карбонильные цилиндрические сердечники.
*а* — СЦР; *б* и *в* — СЦГ; *г* — СЦТ.

Стержневые ферритовые сердечники изготовляются из материала марки 1000НН и 600НН следующих типоразмеров: СС1,2×10; СС1,8×12; СС3,5×20; СС3,5×30. Первое число в обозначении типоразмера указывает диаметр, а второе — длину сердечника в миллиметрах.

Для расчета дросселей с цилиндрическими сердечниками из феррита необходимо знать эффективную проницаемость $\mu_{эфф}$. На рис. 49 показаны кривые зависимости эффективной проницаемости от отношения длины сердечника к его диаметру. Зная эффективную проницаемость и полагая, что однослойная обмотка полностью покрывает сердечник, число витков обмотки рассчитывают по формуле

$$w = \sqrt{\frac{L_{др}}{k' D_{к} \mu_{эфф}}},$$

где $L_{др}$ — требуемая индуктивность дросселя, *мкгн;*

$D_{к}$ — диаметр обмотки, *см.*

Коэффициент $k'$ определяется из графика на рис. 50, где $l_{к}$ и $D_{к}$ — длина и диаметр обмотки.

Цилиндрические ферритовые сердечники широко применяются в качестве антенн для радиоприемных устройств. Эффективная магнитная проницаемость антенных стержней лежит в пределах от 2 000

Таблица 15

**Основные данные цилиндрических карбонильных сердечников**

| Тип сердечника | Размеры, мм | | Среднее значение эффективной магнитной проницаемости сердечника, $\mu_c$ | | Среднее значение добротности катушек | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | D | l | Класса А | Класса Б | Класса А | Класса Б |
| СЦР-1 | 1М6 | 10 | 1,50 | 1,70 | 130 | 90 |
| СЦР-2 | 1М6 | 19 | 1,65 | 1,95 | 135 | 92 |
| СЦР-3 | 1М7 | 10 | 1,60 | 1,70 | 130 | 100 |
| СЦР-4 | 1М7 | 19 | 1,75 | 1,95 | 140 | 97 |
| СЦР-5 | 1М8 | 10 | 1,60 | 1,70 | 130 | 105 |
| СЦР-6 | 1М8 | 19 | 1,80 | 1,90 | 145 | 105 |
| СЦР-7 | 1М9 | 10 | 1,50 | 1,65 | 140 | 105 |
| СЦР-8 | 1М9 | 19 | 1,75 | 1,85 | 145 | 110 |
| СЦГ-1 | 9,3 | 10 | 2,10 | 2,10 | 160 | 130 |
| СЦГ-2 | 9,3 | 19 | 2,45 | 2,35 | 185 | 137 |
| СЦТ-1 | 9,3 | 10 | 2,00 | 2,00 | 160 | 130 |
| СЦТ-2 | 9,3 | 19 | 2,35 | 2,20 | 180 | 137 |

до 20. Основным параметром, определяющим качество антенны, которым необходимо руководствоваться при выборе марки феррита, является тангенс угла потерь материала сердечника в заданной

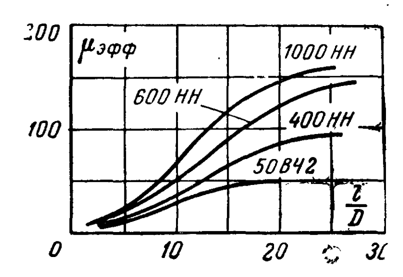



Рис. 49. График зависимости эффективной магнитной проницаемости от отношения $l/D$ для сердечников из ферритов с различной магнитной проницаемостью.

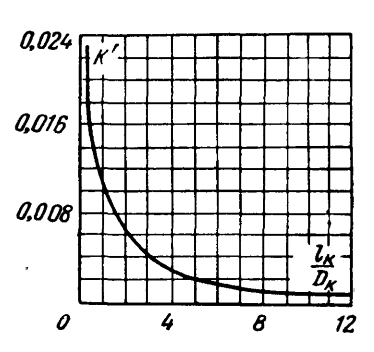



Рис. 50. График зависимости коэффициента $k$ от соотношения $l_к/D_к$.

области частот. Основные параметры антенных стержней при диаметре 8 и длине 160 *мм* из марганцево-цинковых и никель-цинковых ферритов приведены в табл. 16.

Наиболее широкое применение получили следующие размеры ферритовых сердечников для антенн радиоприемной аппаратуры.

| Сечение стержней | Длина $l$, *мм* |
|---|---|
| Круглое $D=8$ *мм* | 60, 65, 80, 100, 125, 140, 160 |
| Круглое $D=10$ *мм* | 200 |
| Прямоугольное $16\times4$ *мм* | 80, 100, 125 |
| Прямоугольное $20\times3$ *мм* | 115, 125 |
| Прямоугольное $25\times5$ *мм* | 160, 200 |

Таблица 16

**Основные параметры антенных стержней для различных диапазонов длин волн**

| Диапазон частот радиовещательного приемника | Частота $f$, *Мгц* | | Длина волны, *м* | | Марка феррита | $\mu_{эфф}$ | $tg\,\delta\cdot10^{-3}$ | $L$, *мкгн* | $Q$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | минимальная | максимальная | максимальная | минимальная | | | при $f_{макс}$ | | |
| СДВ | 0,01 | 0,15 | 30 000 | 2 000 | 2000НМ1 | 100 | 2 | — | — |
| ДВ | 0,15 | 0,408 | 2 000 | 735 | 2000НМ1 | 100 | 5 | 4 100 | 120 |
| СВ | 0,52 | 1,6 | 575 | 187 | 700НМ | 140 | 4 | 370 | 120 |
| КВ | 4,0 | 12,0 | 75 | 25 | 150ВЧ | 80 | 8 | 5,5 | 100 |
| КВ | 6,0 | 18,0 | 50 | 17 | 100ВЧ | 65 | 6 | 2,2 | 140 |
| КВ | 9,0 | 27,0 | 33 | 11 | 50ВЧ2 | 40 | 4 | 0,8 | 180 |
| УКВ | 66 | 73 | 4,55 | 4,1 | 30ВЧ2 | 30 | 25 | 0,15 | 160 |

При конструировании катушек индуктивности с цилиндрическими сердечниками следует иметь в виду, что произведение $\mu_{эфф}Q=$ $=\mathrm{const}$ в рабочем диапазоне частот. Это обстоятельство позволяет, изменяя соотношение $l/D$, добиться необходимого значения добротности катушки.

## Катушки индуктивности с кольцевыми сердечниками

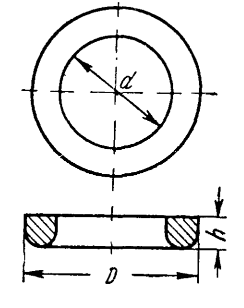



Рис. 51. Тороидальный сердечник из альсифера.

Наиболее полное использование магнитных свойств материала сердечника дает кольцевой (тороидальный) сердечник. Катушки индуктивности с кольцевыми сердечниками применяются в тех случаях, когда требуется максимальная индуктивность при минимальных размерах катушки. Достоинством тороидальных катушек является большая добротность и практически полное отсутствие внешнего поля рассеяние. Последнее устраняет необходимость экранирования катушек. Достоинством также является возможность получения сильной связи между обмотками, расположенными на одном сердечнике, а недостатком — сложность намотки и невозможность плавной регулировки индуктивности. Тороидальные сердечники выполняются из ферритов и альсиферов.

Сердечники из альсифера применяются на частотах до 1—1,5 *Мгц*. На более высоких частотах добротность катушек с альси-

Таблица 17

**Размеры альсиферовых кольцевых сердечников**

| Наружный диаметр $D$, *мм* | Внутренний диаметр $d$, *мм* | Высота $h$, *мм* | Площадь сечения сердечника $S_c$, *см*² |
|---|---|---|---|
| 15 | 7 | 4,8 | 0,175 |
| 15 | 7 | 6,8 | 0,250 |
| 19 | 11 | 4,8 | 0,175 |
| 19 | 11 | 6,7 | 0,250 |
| 24 | 13 | 5,2 | 0,250 |
| 24 | 13 | 7,0 | 0,350 |
| 36 | 25 | 7,5 | 0,380 |
| 36 | 25 | 9,7 | 0,500 |
| 44 | 28 | 7,2 | 0,500 |
| 44 | 28 | 10,3 | 0,750 |
| 55 | 32 | 8,2 | 0,800 |
| 55 | 32 | 9,7 | 1,00 |
| 55 | 32 | 11,7 | 1,20 |
| 64 | 40 | 9,7 | 1,00 |
| 64 | 40 | 14,0 | 1,50 |
| 75 | 46 | 12,0 | 1,50 |
| 75 | 46 | 16,8 | 2,20 |

феровыми сердечниками ниже, чем с сердечниками из карбонильного железа. Размеры тороидальных сердечников из альсифера (рис. 51) приведены в табл. 17. Основные параметры сердечников приведены в табл. 18. Буквы в обозначении марки альсифера означают: ТЧ — тональная частота, ВЧ — высокая частота, К — компенсированный температурный коэффициент магнитной проницаемости. Наряду с двумя цветными полосами в маркировке альсиферового сердечника существует знак в виде одной полосы. Альсиферовые сердечники с одной маркировочной полосой применяются для изготовления катушек фильтров, которые используются в аппаратуре проводной связи.

Таблица 18

**Основные параметры альсиферов**

| Тип сердечника | Начальная магнитная проницаемость $\mu_0$ | Максимальная рабочая частота, *кгц* | Коэффициент потерь на гистерезис $\delta_г$ | Маркировочный знак |
|---|---|---|---|---|
| ТЧ-60 | 55—60 | 10 | $6 \cdot 10^{-5}$ | Две черные полосы |
| ТЧК-55 | 50—60 | 10 | $6 \cdot 10^{-5}$ | „ красные „ |
| ВЧ-32 | 30—34 | 50 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | „ белые „ |
| ВЧ-22 | 20—24 | 100 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | „ зеленые „ |
| ВЧК-22 | 20—24 | 100 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | „ желтые „ |

Число витков катушек индуктивности с тороидальными сердечниками из альсифера определяется по формуле

$$w = A\sqrt{L},$$

где $A$ — коэффициент, значения которого приведены в табл. 19;
$L$ — заданная индуктивность, *мгн*.

Таблица 19

**Значения коэффициента $A$**

| ТЧ-60 | ТЧК-55 | ВЧ-32 | ВЧК-22 | Диаметр, *мм* | | Диаметр провода с изоляцией, *мм* | Средняя длина витка, *см* | Сечение, *см²* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент $A$ | | | | наружный | внутренний | | | |
| 104 | 109 | 142 | 172 | 64 | 40 | $\frac{28}{\sqrt{w}}$ | 8,28 | 2,0 |
| 93 | 97 | 126 | 154 | 64 | 40 | | 9,2 | 2,5 |
| 85 | 89 | 116 | 140 | 64 | 40 | $\frac{18}{\sqrt{w}}$ | 9,9 | 3,0 |
| 107 | 111 | 1[illegible]6 | 176 | 55 | 32 | | 7,26 | 1,6 |
| 95 | 100 | 130 | 157 | 55 | 32 | $\frac{16}{\sqrt{w}}$ | 7,58 | 2,0 |
| 87 | 91 | 119 | 143 | 55 | 32 | | 8,26 | 2,4 |
| 123 | 128 | 168 | 202 | 44 | 28 | | 6,00 | 1,0 |
| 110 | 114 | 150 | 181 | 44 | 28 | | 6,66 | 1,25 |
| 100 | 99 | 137 | 165 | 44 | 28 | $\frac{13}{\sqrt{w}}$ | 7,16 | 1,5 |
| 133 | 139 | 182 | 220 | 36 | 25 | | 5,30 | 0,72 |
| 129 | 135 | 177 | 214 | 36 | 25 | $\frac{7}{\sqrt{w}}$ | 5,50 | 0,76 |
| 113 | 118 | 154 | 186 | 36 | 25 | | 6,38 | 1,0 |
| 124 | 130 | 170 | 205 | 24 | 13 | $\frac{5,5}{\sqrt{w}}$ | 3,55 | 0,5 |
| 104 | 108 | 142 | 171 | 24 | 13 | | 4,27 | 0,72 |
| 134 | 140 | 183 | 221 | 19 | 11 | | 3,0 | 0,54 |
| 112 | 117 | 154 | 185 | 19 | 11 | | 3,8 | 0,72 |

Исходя из средней длины витка $l_{ср}$ для данного типоразмера сердечника, приведенной в табл. 19, можно определить длину обмоточного провода $l_{пр} = l_{ср}w$.

Длину провода необходимо находить исходя из того, что намотка подобных катушек производится специальным челноком, на который предварительно наматывается провод. Диаметр провода определяется по формулам, приведенным в табл. 19.

Тородиальные сердечники из феррита подразделяются на четыре основных типа, характеризующихся различным отношением наружного диаметра $D$ к внутреннему $d$. Наименование тороидальных сердечников составляется из буквы К и трех цифр, обозначающих соответственно наружный диаметр, внутренний диаметр и высоту сердечника; все линейные размеры выражаются в миллиметрах. Наиболее распространенные типоразмеры ферритовых тороидальных сердечников приведены в табл. 20.

Таблица 20

**Размеры тороидальных сердечников**

| $D/d$ | Типоразмер | $l_{ср}$, *см* | $S_{с}$, *см*$^2$ | $S_0$, *см*$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 2,5 | К2,5×1×0,8 | 0,55 | 0,06 | 0,0785 |
| | К2,5×1×1,2 | | 0,09 | |
| | К4,0×1,6×1,2 | 0,88 | 0,0144 | 0,0201 |
| | К4,0×1,6×1,8 | | 0,0216 | |
| | К6×2,5×1,8 | 1,33 | 0,0315 | 0,0491 |
| | К6×2,5×2,8 | | 0,049 | |
| | К10×4×3 | 2,2 | 0,09 | 0,0126 |
| | К10×4×4,5 | | 0,135 | |
| | К15×6×4,5 | 3,3 | 0,203 | 0,283 |
| | К15×6×7 | | 0,315 | |
| 2 | К1,2×0,6×0,4 | 0,27 | 0,0012 | 0,00283 |
| | К2×1×0,5 | 0,47 | 0,0025 | 0,00785 |
| | К3,2×1,6×0,8 | 0,75 | 0,0064 | 0,0201 |
| | К5×2,5×1,2 | 1,18 | 0,015 | 0,0491 |
| | К8×4×2 | 1,85 | 0,04 | 0,0126 |
| | К12×6×3 | 2,82 | 0,09 | 0,283 |
| | К20×10×5 | 4,71 | 0,25 | 0,785 |
| | К32×16×8 | 7,55 | 0,64 | 2,01 |
| | К50×25×6 | 11,8 | 0,75 | 4,91 |
| | К50×25×9 | 11,8 | 1,13 | 4,91 |
| 1,6 | К1×0,6×0,3 | 0,25 | 0,0006 | 0,00283 |
| | К1,6×1×0,3 | 0,40 | 0,0009 | 0,00785 |
| | К2,5×1,6×0,5 | 0,64 | 0,0022 | 0,0201 |
| | К4×2,5×0,8 | 1,02 | 0,0060 | 0,0314 |
| | К7×4×1,5 | 1,75 | 0,0225 | 0,126 |
| | К10×6×2 | 2,51 | 0,04 | 0,283 |
| | К16×10×3 | 4,09 | 0,09 | 0,785 |
| | К28×16×6 | 6,92 | 0,36 | 2,01 |
| | К40×25×7,5 | 10,2 | 0,563 | 4,91 |
| | К65×40×6 | 16,5 | 0,7 | 12,6 |
| | К100×60×10 | 25,1 | 2,0 | 28,3 |
| 1,4 | К1,4×1×0,4 | 0,379 | 0,0008 | 0,00785 |
| | К2,2×1,6×0,8 | 0,60 | 0,0018 | 0,0201 |
| | К3,5×2,5×1 | 0,943 | 0,005 | 0,0491 |
| | К5,5×4×1,5 | 1,49 | 0,0113 | 0,126 |

Индуктивность тородиальной катушки с сердечником любого сечения вычисляется по формуле

$$L = \frac{1,26\mu_c w^2 S_c}{l_{ср}} 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки. *мкгн;*

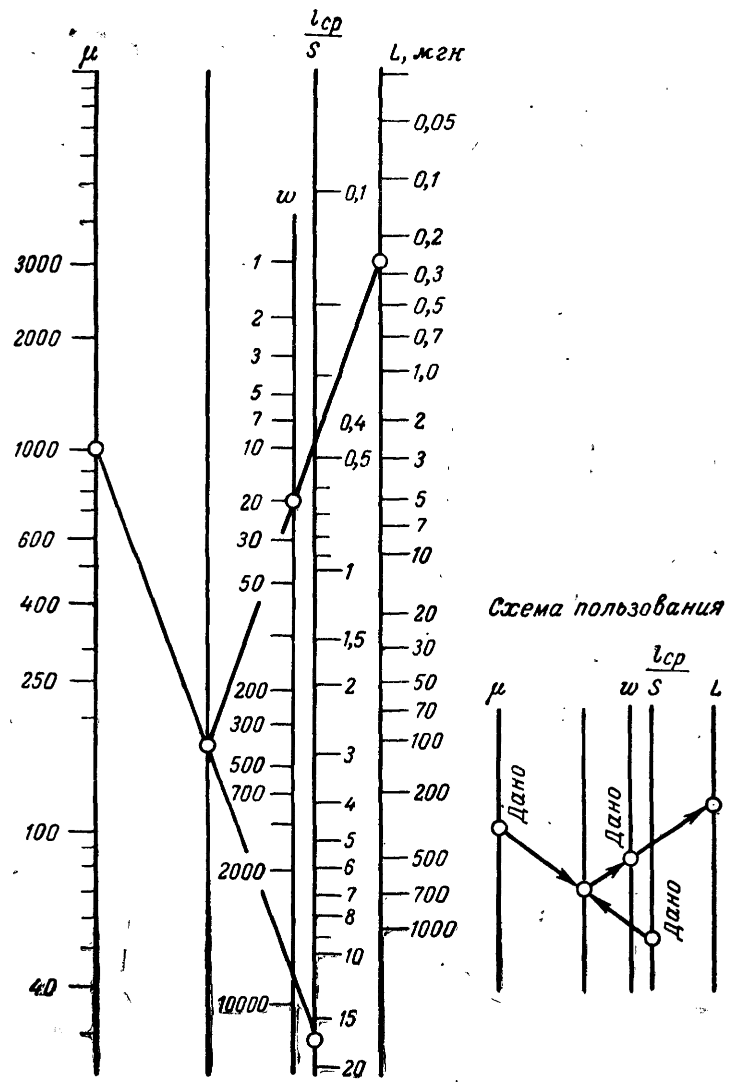



Рис. 52. Номограмма для расчета индуктивности катушек с тороидальными сердечниками.

$w$ — число витков катушки;
$l_{ср}$ — длина средней магнитной линии, *см*;
$S_c$ — площадь сечения магнитопровода, *см*²;
$\mu_c$ — магнитная проницаемость сердечника.

Средняя длина магнитной линии определяется по формуле

$$l_{ср} = \pi \left(\frac{D + d}{2}\right).$$

Площадь сечения магнитопровода равна:
для тора круглого сечения

$$S_c = 0{,}25\pi d^2,$$

где $d$ — диаметр сечения магнитопровода, *см*;
для тора прямоугольного сечения

$$S_c = bh,$$

где $b$ — ширина сечения магнитопровода, *см*;
$h$ — высота тора, *см*;
для тора прямоугольного сечения со скругленными краями

$$S_c = bh - 0{,}86r^2,$$

где $r$ — радиус скругления, *см*.

Для быстрого определения величины индуктивности тороидальных катушек можно воспользоваться номограммой, представленной на рис. 52.

## Катушки индуктивности с броневыми сердечниками

Броневые сердечники нашли широкое применение в резонансных контурах и фильтрах радиоэлектронной аппаратуры. Броневые сердечники изготовляют из карбонильного железа или из феррита. Сердечники могут быть с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью (рис. 53).

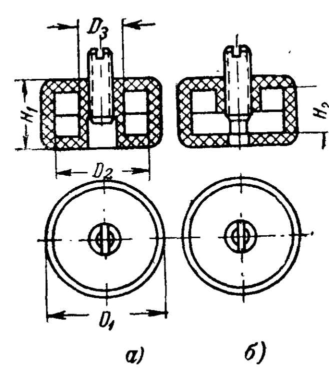



Рис. 53. Броневые сердечники.
*а* — с замкнутой магнитной цепью (СБа); *б* — с разомкнутой магнитной цепью (СБб).

Броневые сердечники с замкнутой магнитной цепью (СБа) позволяют изготовлять катушку меньших размеров, чем катушка той же индуктивности, но без сердечника. Сердечники с разомкнутой магнитной цепью (СБб) обеспечивают большие добротности и могут работать на более высоких частотах.

Броневые сердечники обладают слабым внешним полем, что ослабляет паразитные связи и позволяет приближать экраны к самому сердечнику. Для подстройки индуктивности броневые корпуса сердечников снабжены цилиндрическими подстроечными сердечниками, перемещение которых изменяет индуктивность на 20—

30%. Это понижает требования к точности изготовления намотки. Броневые сердечники из карбонильного железа обозначаются СБ, а из ферритов — Б и ОБ.

Броневые сердечники из карбонильного железа типа СБ в зависимости от их размеров делятся на шесть наиболее распространенных видов: СБ-9а, СБ-12а, СБ-23-11а, СБ-23-17а, СБ-28а и СБ-34а. Размеры этих сердечников и их основные данные приведены в табл. 21.

Таблица 21

**Основные данные броневых сердечников из карбонильного железа**

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | СБ-9а | СБ-12а | СБ-18а | СБ-21-11а | СБ-23-17а | СБ-28а | СБ-34а |
| $D_1$ | 9,6 | 12,3 | 18 | 23 | 23 | 28 | 34 |
| $D_2$ | 7,5 | 10 | 14 | 18,5 | 18 | 23 | 27 |
| $D_3$ | 4,6 | 6 | 9 | 11 | 11 | 13 | 13,5 |
| $H_1$ | 7,6 | 11 | 14,8 | 11,4 | 17,4 | 23,4 | 28,4 |
| $H_2$ | 4,2 | 8,2 | 10,4 | 6,2 | 12 | 17 | 20,4 |
| Подстроечник | М3×8 | М4×11,5 | М5×13,5 | 1М7×13 | 1М7×19 | 1М8×13 | 1М8×30 |
| $\mu_0$ | 3 | 4,5 | — | 3,7 | 4,6 | 4,7 | 4,5 |

Число витков катушек с броневыми сердечниками типа СБ можно определить по формуле

$$w = n\sqrt{L},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

$n$ — постоянная, определяемая размерами сердечника и свойствами магнитного материала.

Для некоторых видов сердечников значения величины $n$ указаны в табл. 22.

Таблица 22

**Значения коэффициента $n$**

| Тип сердечника | $n$ | Тип сердечника | $n$ |
|---|---|---|---|
| СБ-9а | 7,05 | СБ-23-17а | 4,5 |
| СБ-12а | 6,7 | СБ-28а | 4,3 |
| СБ-23-11а | 4,0 | СБ-34а | 4,4 |

В табл. 23 указаны максимальные значения индуктивности, которые можно получить с различными видами сердечников при использовании провода различных марок.

На рис. 54—63 показаны графики, позволяющие с достаточной для практических целей точностью определить конструктивные данные, необходимые для намотки катушек с сердечниками СБ-12а—СБ-34а. Графики построены для катушек, в которых применялись каркасы без секций, изготовленные из органического стекла.

Броневые сердечники типа Б изготавливаются из феррита марки 2000НМ1, 2000НМ, 1500НМ2, 1500НМ3 и др. Для диапазона частот

Таблица 23

**Максимальная индуктивность катушек с броневыми сердечниками типа СБ**

| Марка провода | Тип сердечника | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | СБ-12а | | СБ-23-11а | | СБ-23-17а | | СБ-28а | | СБ-34а | |
| | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* |
| ПЭВ 0,1 | 570 | 7 | 650 | 24 | 1 350 | 95 | 3 000 | 440 | 4 350 | 920 |
| ПЭВ 0,15 | 230 | 1,35 | 275 | 4,2 | 590 | 17,5 | 1 300 | 89 | 2 290 | 250 |
| ПЭВ 0,2 | 108 | 0,24 | 144 | 1,1 | 375 | 6,9 | 700 | 23,5 | 1 090 | 57 |
| ПЭЛШО 0,1 | 164 | 0,56 | 210 | 2,5 | 480 | 11,7 | 945 | 47,5 | 1 610 | 125 |
| ЛЭШО 7×0,07 | 58 | 0,07 | 67 | 0,24 | 160 | 1,25 | 386 | 7,1 | 616 | 18 |

Примечание. *w* — число витков; *L* — индуктивность, *мгн*.

5—100 *Мгц* применяются никель-цинковые ферриты группы ВЧ с начальной магнитной проницаемостью от 150 до 20. Для контурных катушек индуктивности рекомендуются термостабильные ферриты марок 20ВЧ и 50ВЧ; некоторые практические данные о катушках

Таблица 24

**Основные данные броневых сердечников из феррита**

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Б6 | Б9 | Б11 | Б14 | Б18 |
| $D_1$ | 6,5 | 9 | 11 | 14 | 18 |
| $D_2$ | 5,1 | 7,6 | 9,4 | 11,8 | 14 |
| $D_3$ | 2,7 | 3,5 | 3,7 | 6 | 7,4 |
| $H_1$ | 5,6 | 5,6 | 6,4 | 8,4 | 10,6 |
| $H_2$ | 4 | 4 | 4,4 | 5,8 | 7,4 |
| Подстроечник гладкий | 0,9×6 | 1,5×9 | 1,5×9 | 2,5×12 | 2,5×12 |

*Продолжение табл. 24*

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Б22 | Б26 | Б30 | Б36 | Б48 |
| $D_1$ | 22 | 26 | 30 | 36 | 48 |
| $D_2$ | 18,3 | 21,6 | 25,4 | 30,5 | 40 |
| $D_3$ | 9,2 | 11,3 | 12,3 | 16 | 20 |
| $H_1$ | 13,6 | 16,4 | 19 | 22 | 31,4 |
| $H_2$ | 9,4 | 11,2 | 13,2 | 14,8 | 20,8 |
| Подстроечник гладкий | 3,5×16 | 4,5×20 | 4,5×22 | 4,5×22 | 6,5×32 |

индуктивности с сердечниками из этих ферритов приведены на рис. 64.

Броневые сердечники из феррита имеют общий объем и высоту примерно в 1,5 раза меньше, чем у близких к ним по размерам сер-

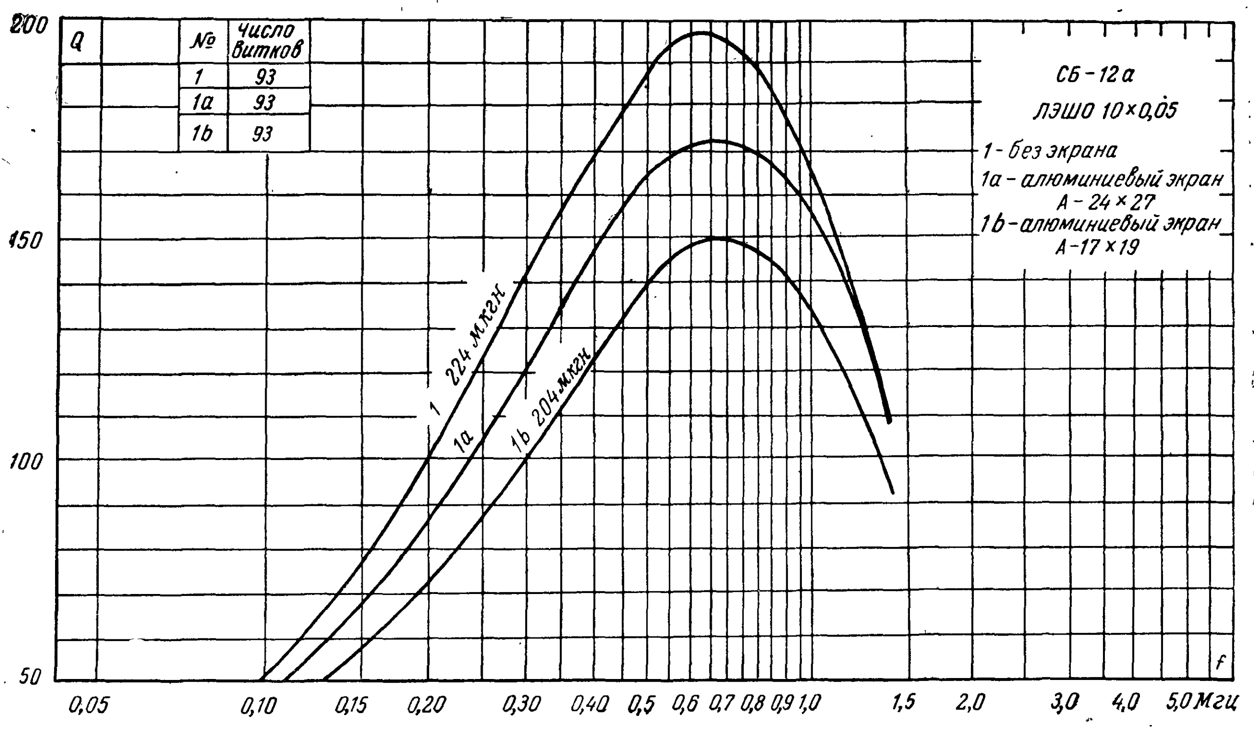



Рис. 54. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-12а.

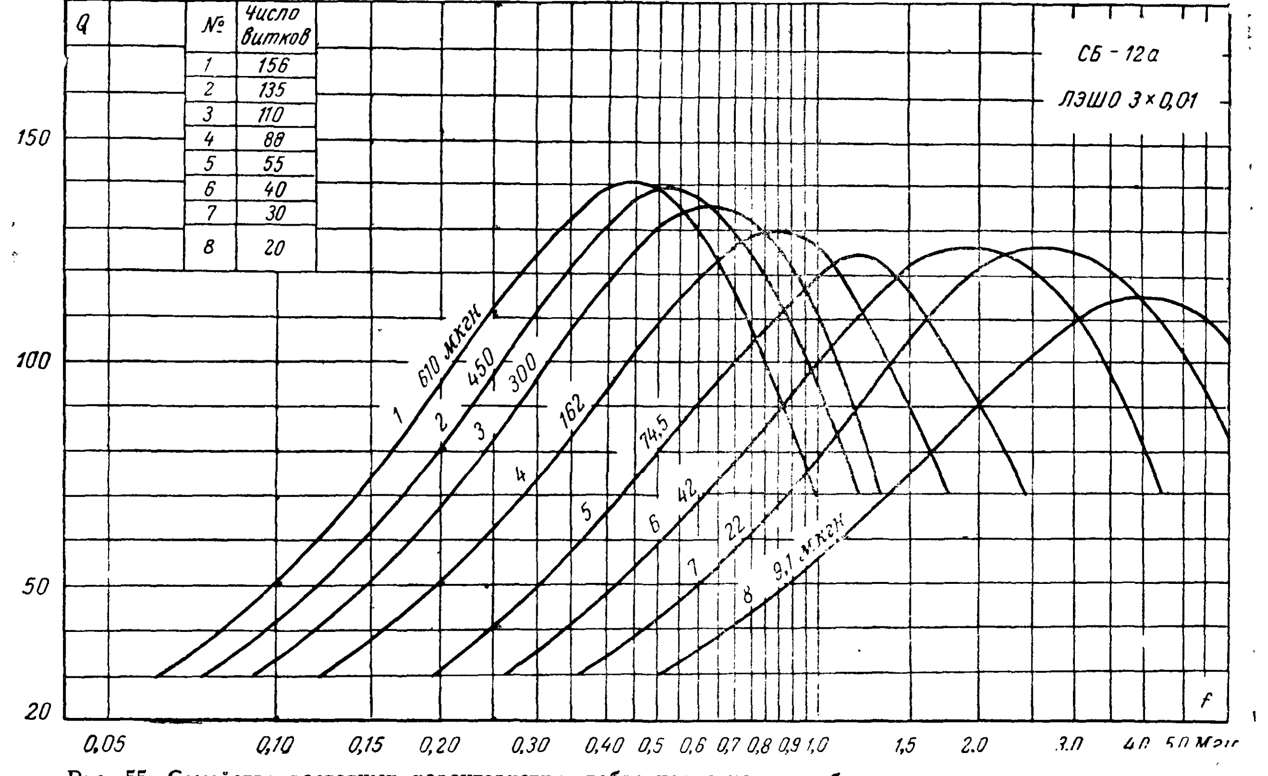



Рис. 55. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-12а.

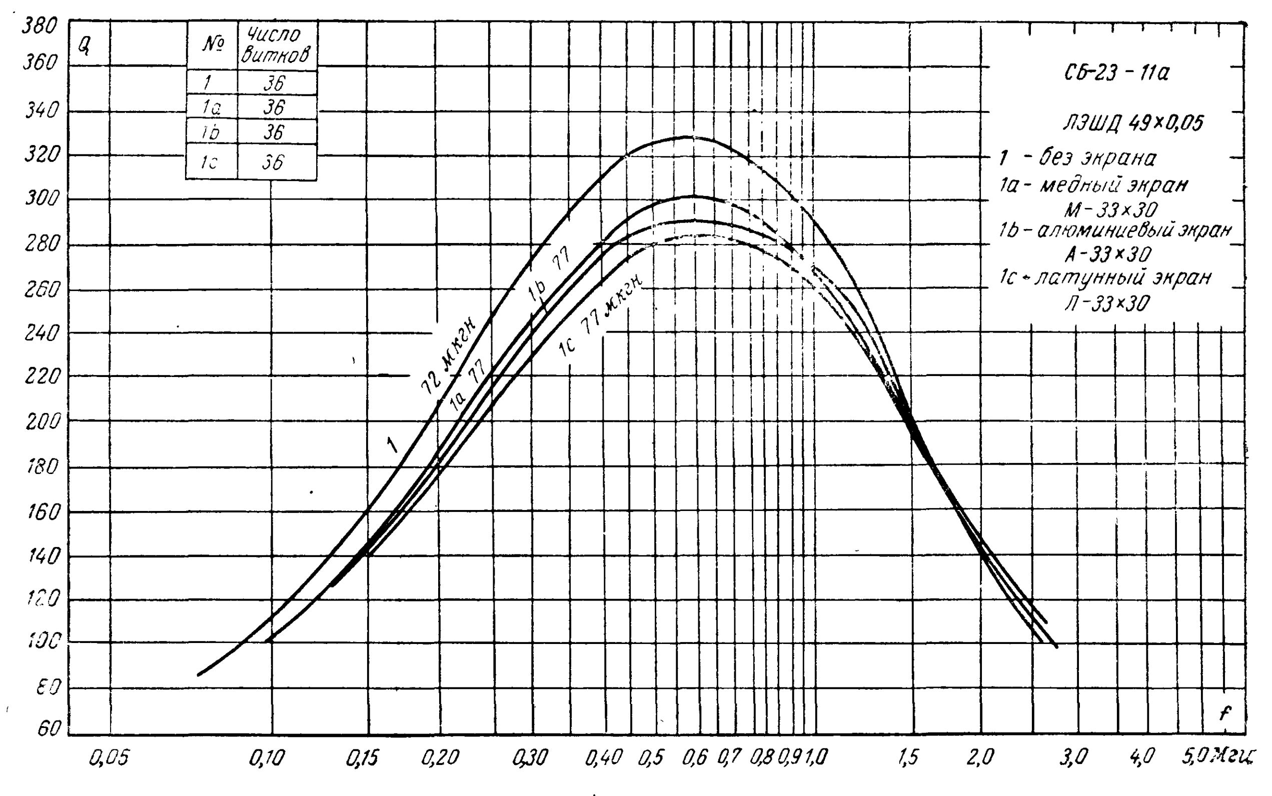



Рис. 56. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-23-11а.

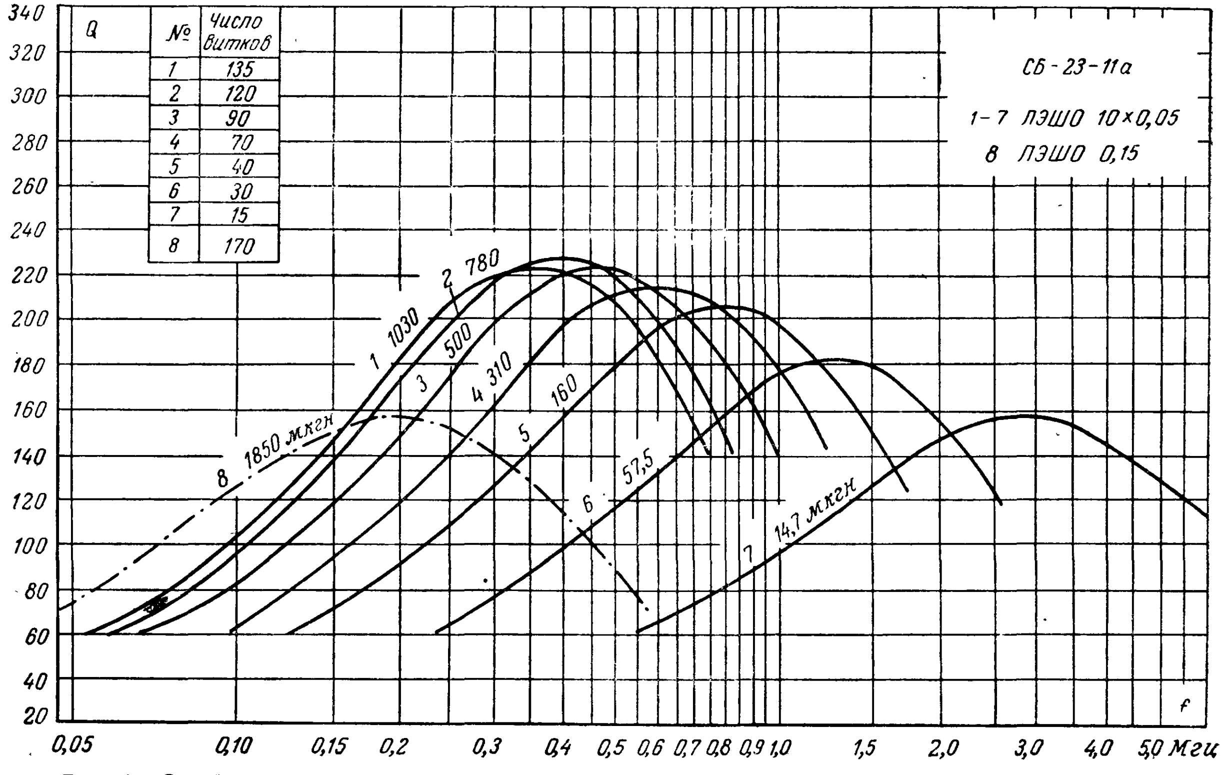



Рис. 57. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-23-11а.

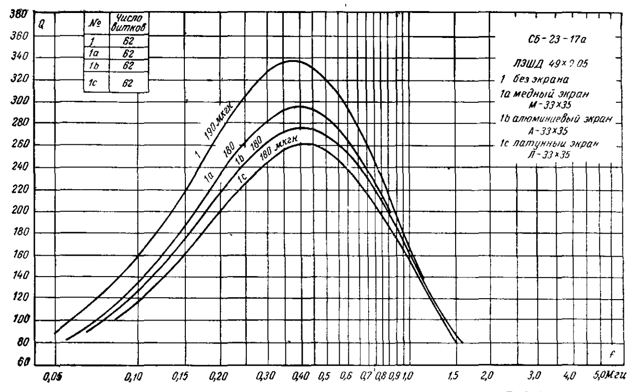



Рис. 58 Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-23-17а.

| № | Число витков |
|---|---|
| 1 | 130 |
| 2 | 107 |
| 3 | 84 |
| 4 | 64 |
| 5 | 42 |
| 6 | 30 |
| 7 | 22 |
| 8 | 17 |
| 9 | 187 |

СБ-23-17а

ЛЭШО 21×0,05

Q

340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20

2100 мкгн
Галетная намотка
9
696
1
600
2
376
3
226
4
100
5
52
6
24
7
15 мкгн
8

f

0,05 0,10 0,15 0,20 0,30 0,40 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,5 2,0 3,0 4,0 5,0 мгц

Рис. 59. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-23-17а.

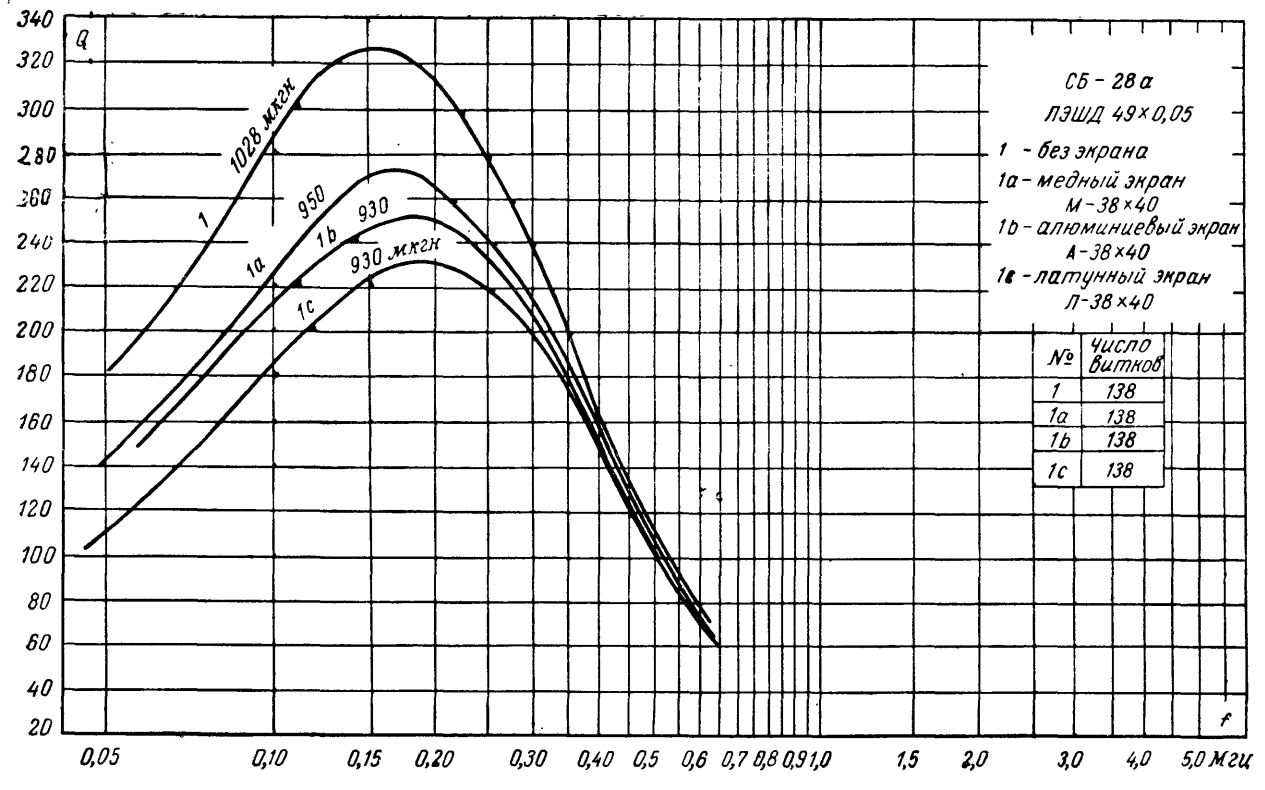



Рис. 60. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-28а.

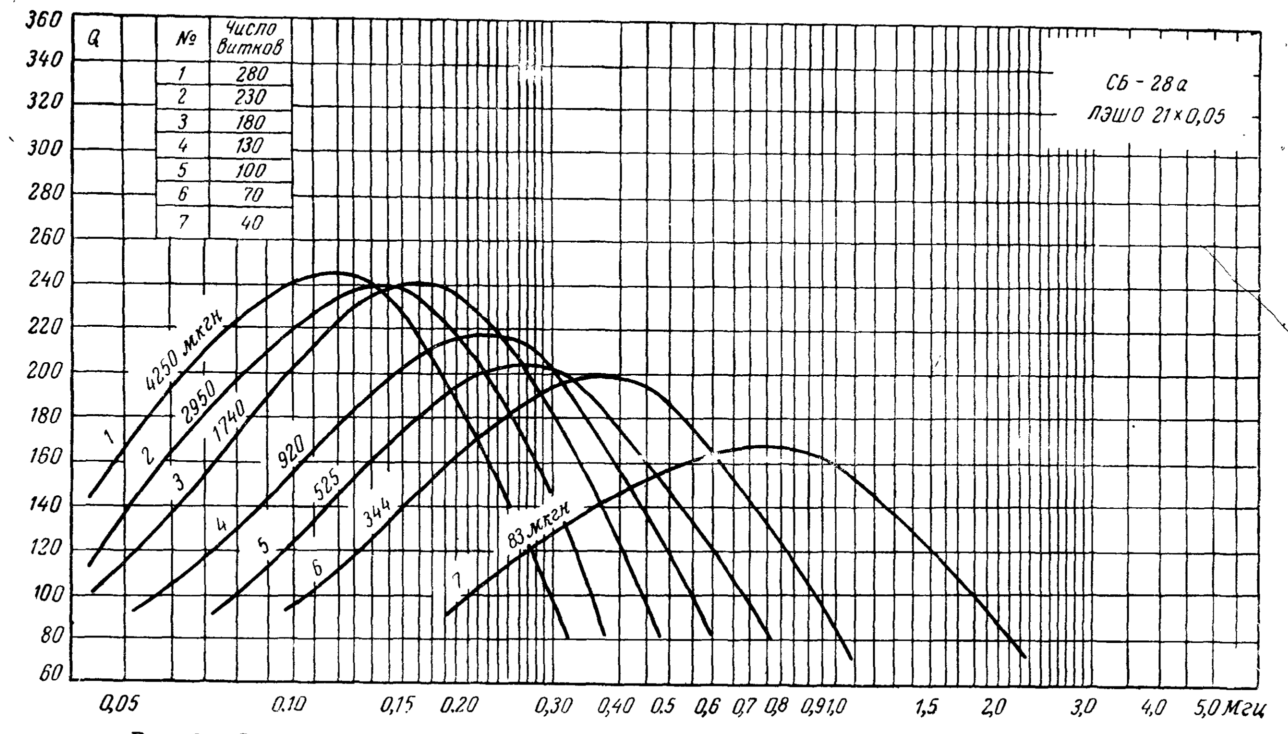



Рис. 61. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-28а.

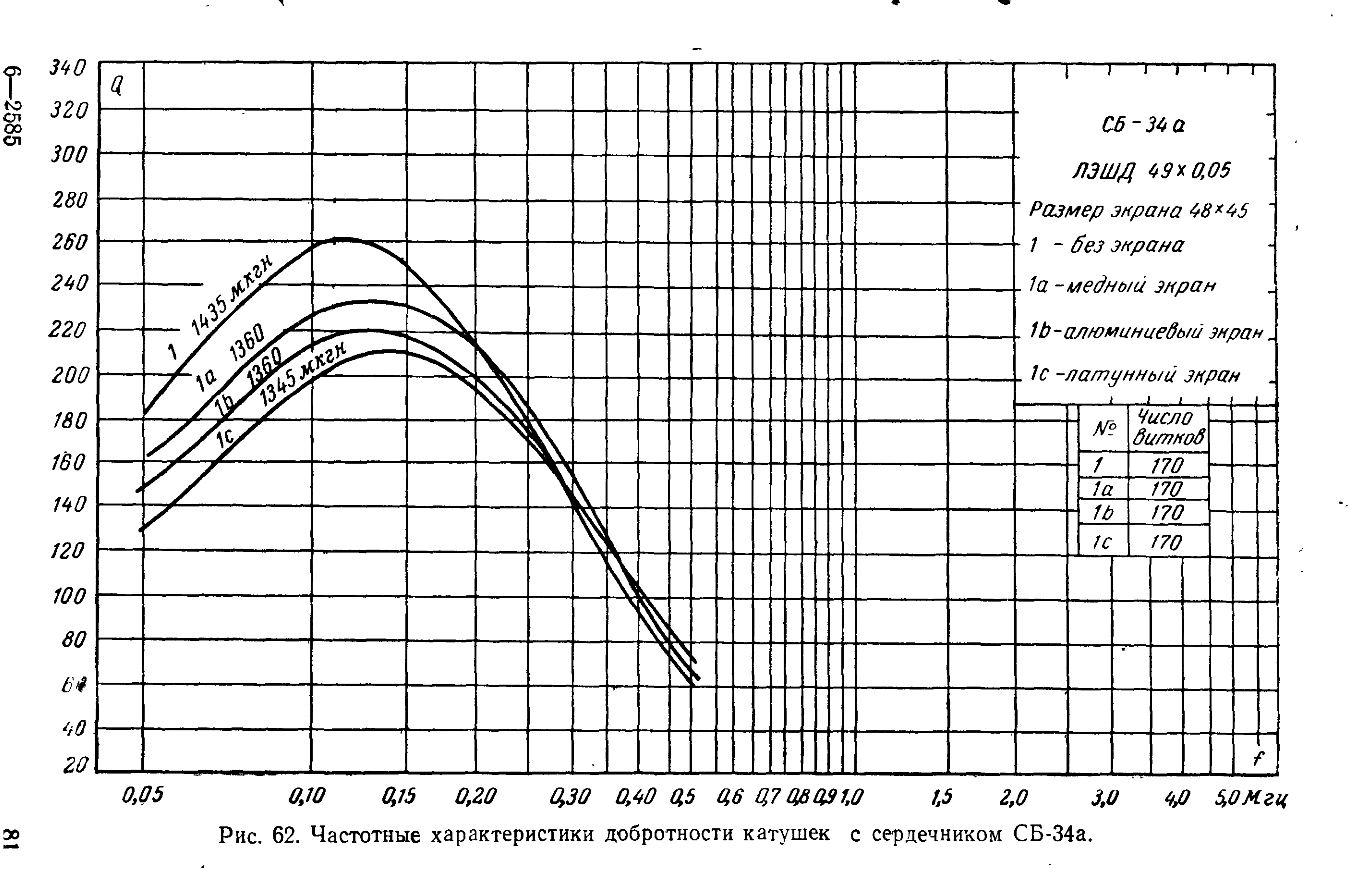
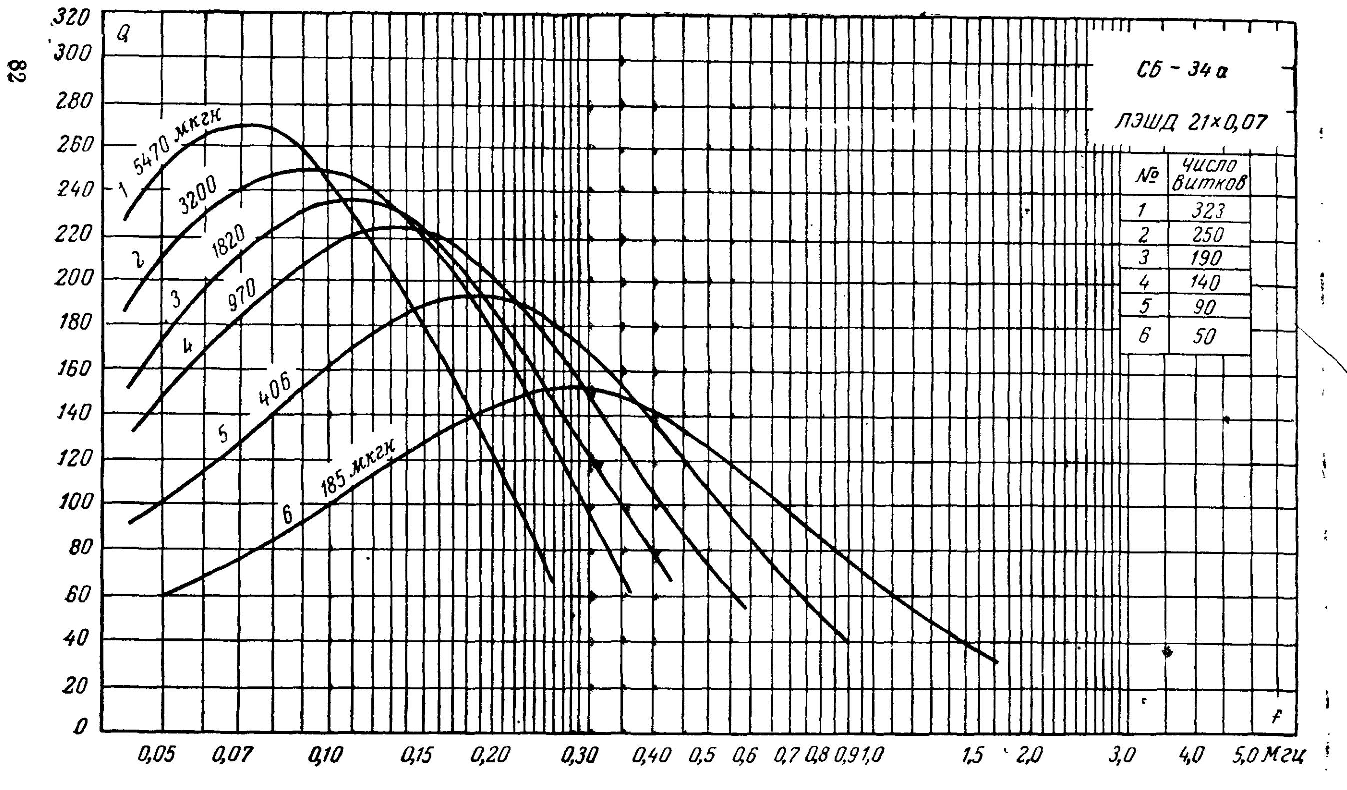



Рис. 62. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-34а.




| № | Число витков |
|---|---|
| 1 | 323 |
| 2 | 250 |
| 3 | 190 |
| 4 | 140 |
| 5 | 90 |
| 6 | 50 |

Рис. 63. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-34а.

дечников типа СБ, например, Б11 и СБ-12а или Б22 и СБ-23-17а, а объем обмоточного пространства лишь незначительно меньше. Основные параметры броневых сердечников из феррита приведены в табл. 24.

Для определения по заданным значениям $\mu_{эфф}$ и индуктивности числа витков катушек с сердечниками типа Б на рис. 65 представлена номограмма, по которой определяется вспомогательный коэффициент $a$, а число витков определяется по формуле

$$w = ak,$$

где $k$ — коэффициент, значения которого приведены в табл. 25.

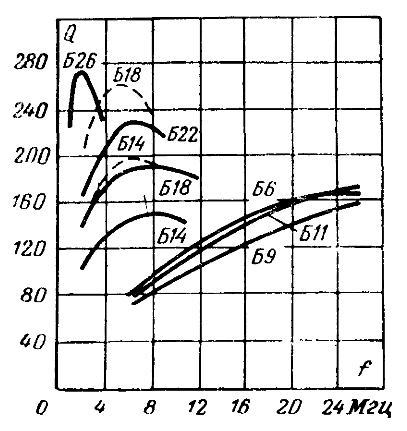



Рис. 64. Зависимость добротности $Q$ катушек индуктивности на сердечниках ряда Б из ферритов 20ВЧ (сплошные линии) и 50ВЧ2 (пунктирные линии) от частоты.

Номограммы на рис. 66 и 67 дают зависимость между числом витков $w$, сопротивлением обмотки постоянному току $R$ и диаметром провода $d$ катушки, намотанной до полного заполнения односекционного каркаса для различных сердечников. На номограммах по оси ординат отложены числа витков, а по оси абсцисс — диаметр провода без изоляции.

Таблица 25

**Значения коэффициента $k$**

| Тип сердечника | Коэффициент $k$ | Тип сердечника | Коэффициент $k$ |
|---|---|---|---|
| Б6 | 4,13 | Б22 | 2,13 |
| Б9 | 3,65 | Б26 | 1,90 |
| Б11 | 2,93 | Б30 | 1,86 |
| Б14 | 2,66 | Б36 | 1,55 |
| Б18 | 2,27 | Б48 | 1,40 |

Номограммы на рис. 68 дают зависимость между числом витков, сопротивлением обмотки постоянному току и сечением провода ЛЭШО обмотки катушки с сердечниками типа Б.

Катушки индуктивности с броневыми сердечниками, выполненными из феррита, имеют высокие значения добротности (рис. 69). Добротность катушки с сердечником зависит от потерь, вносимых катушкой и сердечником

$$Q = \frac{\omega L}{R_0 + R_c},$$

где $L$ — индуктивность катушки с сердечником;

Для катушек с замкнутым сердечником $Q_c = Q_м$, следовательно,

$$Q = \frac{Q_0 Q_м}{Q_0 + Q_м},$$

где $Q_м$ — добротность материала сердечника, равная $1/\operatorname{tg}\delta_c$.

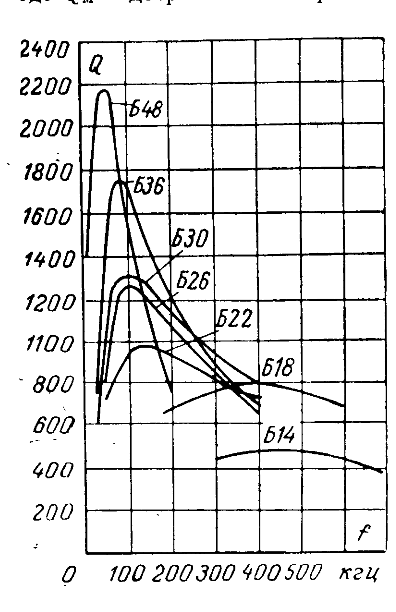



Рис. 69. Зависимость добротности $Q$ катушек, выполненных на сердечниках ряда Б из феррита 1000НМ3 от частоты.

Если используется сердечник с зазором, то его добротность будет равна

$$Q'_c = Q_c \left(1 + \mu_0 \frac{l_з}{l_{ср}}\right).$$

Добротность обмотки при этом

$$Q'_0 = \frac{Q_0}{1 + \mu_0 \frac{l_з}{l_{ср}}},$$

где $\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость сердечника;

$l_{ср}$ — средняя длина магнитной линии сердечника без учета зазора, *мм*.

Если добротность обмотки с сердечником без зазора выше добротности материала сердечника, то введение зазора повышает добротность сердечника и общую добротность катушки. При определенной величине зазора добротность катушки будет максимальной. Зазор, обеспечивающий наибольшую добротность, называется оптимальным и может быть определен по формуле

$$l_з = \frac{l_{ср}}{\mu_0}\left(\sqrt{\frac{Q_0}{Q_c}} - 1\right).$$

Таблица 26

**Параметры катушек**

| Тип сердечника | Кривая | $\mu_{эфф}$ | $l_з$, *мм* | $L$, *мгн* | $w$ | Провод ЛЭШО | $R_0$, *ом* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Б48 | 1 | 340 | 0,10 | 15,3 | 82 | 119×0,07 | 0,33 |
| | 2 | 240 | 0,16 | 10,7 | | | |
| | 3 | 160 | 0,27 | 7,5 | | | |
| | 4 | 130 | 0,35 | 6,0 | | | |
| | 5 | 100 | 0,50 | 4,5 | | | |
| Б14 | 6 | 102 | 0,13 | 0,42 | 48 | 21×0,05 | 0,70 |
| | 7 | 80 | 0,19 | 0,33 | | | |
| | 8 | 59 | 0,30 | 0,25 | | | |
| | 9 | 38 | 0,58 | 0,16 | | | |

Если величина $l_з$ получается отрицательной, то введение зазора не увеличивает добротность. Максимальная добротность катушки с сердечником, в котором обеспечен оптимальный зазор, определяется по формуле

$$Q_{макс} = 0{,}5\sqrt{Q_0 Q_м}.$$

На рис. 70 показана зависимость добротности $Q$ катушек индуктивности с сердечниками из феррита марки 1000НМ3 от частоты $f$ и зазора $l_з$, величина которого приведена в табл. 26.

Точный конструктивный расчет катушек с замкнутыми сердечниками затруднителен, поэтому для расчетов целесообразно использовать графики и номограммы, приведенные в этой главе.

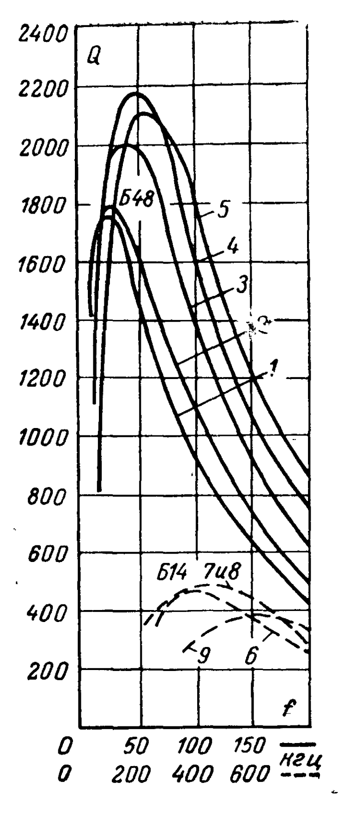



Рис. 70. Зависимость добротности $Q$ катушек, выполненных на сердечниках ряда Б из феррита 1000НМ3 от частоты $f$ и зазора $l_з$.

## Температурная стабильность катушек с магнитными сердечниками

Изменение индуктивности под влиянием температуры характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ), который показывает относительное изменение величины индуктивности, приходящееся на 1° С изменения температуры

$$ТКИ = \frac{\Delta L}{L \Delta t^\circ},$$

где $\Delta L$ — изменение индуктивности;
$\Delta t^\circ$ — изменение температуры.

Для катушки с сердечником ТКИ будет определяться как температурным коэффициентом индуктивности катушки, так и температурным коэффициентом проницаемости сердечника ТК $\mu$. Величина ТК $\mu$ зависит от сорта магнитного материала и условий его изготовления.

Ферриты имеют большие значения температурного коэффициента проницаемости. Чем выше начальная проницаемость, тем сильнее она изменяется при изменении температуры. Поэтому в большинстве случаев ферритовые сердечники используют с немагнитным зазором.

Для катушек с тороидальными и броневыми ферритовыми сердечниками можно считать, что изменение индуктивности катушки от температуры происходит только за счет изменения магнитной проницаемости сердечника. При изменении температуры изменяется не только проницаемость сердечника, но и тангенс угла потерь. Чем выше проницаемость феррита, тем более резко зависит $\operatorname{tg}\delta_c$ от тем-

пературы. При конструировании стабильных катушек индуктивности необходимо учитывать и фактор изменения их добротности от температуры.

Температурный коэффициент индуктивности катушки с сердечником из феррита, имеющим небольшой зазор ($l_з/l_{ср} \leqslant 0{,}01$), может быть определен по формуле

$$ТКИ = \frac{ТК\mu}{1 + \frac{l_з}{l_{ср}} \mu_0},$$

где $\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитная проницаемость сердечника с зазором определяется по формуле

$$\mu_з = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \frac{a}{b}},$$

где $a = l_з/l_{ср}$ — отношение длины зазора к длине магнитной линии сердечника;

$b = S_з/S_c$ — отношение сечения зазора к сечению сердечника (обычно $b = 1$).

Практически ТКИ катушек на броневых сердечниках без зазора из ферритов составляет $(250 \div 300) \cdot 10^{-6}$, а ТКИ катушек на сердечниках с зазором несколько меньше.

Магнитная проницаемость сердечников из карбонильного железа в диапазоне температур от $-60$ до $+100°$ С линейно возрастает с увеличением температуры. Температурный коэффициент индуктивности катушек на броневых сердечниках без зазора из карбонильного железа составляет $(60 \div 100) \cdot 10^{-6}$.

## Дроссели высокой частоты

Дросселем высокой частоты называют катушку индуктивности, включамую в цепь для ограничения токов высокой частоты. В некоторых случаях дросселем называют катушку индуктивности, включаемую в электрическую цепь для получения частотной или фазовой коррекции. Индуктивность высокочастотного дросселя должна быть максимальной при минимальной величине собственной емкости. Ориентировочно индуктивность дросселя должна быть в 10—50 раз больше индуктивности катушки контура, к которому он подключен, так как он изменяет индуктивность и добротность катушек контура. Эквивалентные значения параметров цепи будут равны:

$$L_э = \frac{L_к L_{др}}{L_к + L_{др}};$$

$$Q_э = \frac{Q_к Q_{др} (L_к + L_{др})}{Q_к L_к + Q_{др} L_{др}},$$

поэтому необходимо, чтобы $L_{др} \gg L_к$.

Конструктивно дроссели высокой частоты выполняются в виде однослойных или многослойных катушек. Конструкции дросселей показаны на рис. 71. Для дросселей длинных и средних волн применя-

ется секционированная многослойная намотка. Дроссели для коротких и метровых волн имеют сплошную однослойную намотку, иногда с переменным шагом для улучшения диапазонных свойств. В качестве каркасов для этих дросселей используются керамические стержни от непроволочных постоянных резисторов (тип ВС). Дроссели с малым числом витков и диаметром 3—5 *мм* делаются бескаркасными.

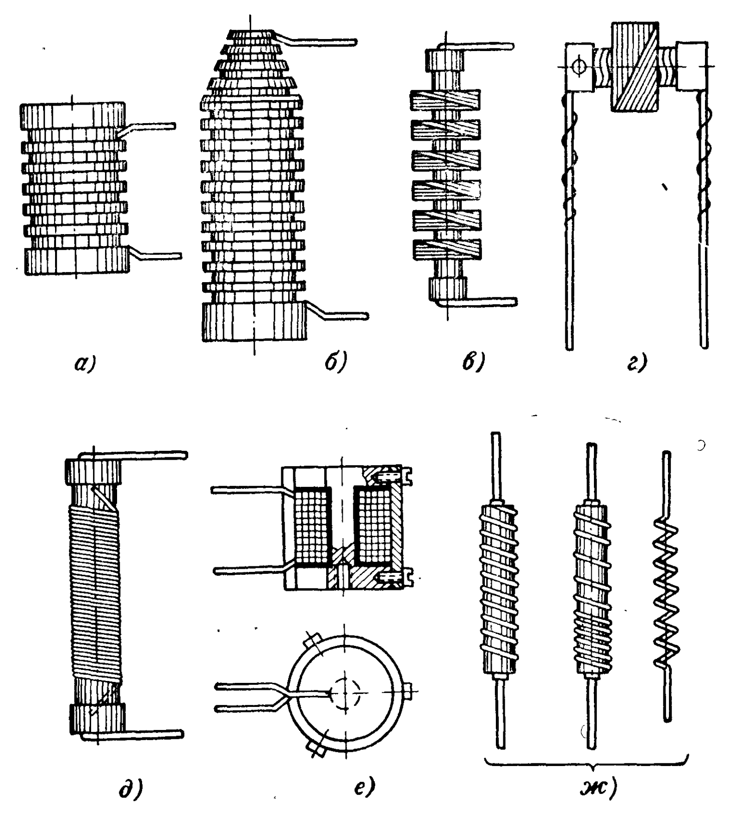



Рис. 71. Устройство дросселей высокой частоты.

*а* — для длинных волн; *б* — для широкого диапазона; *в* — для средних волн; *г* — корректирующий; *д* — для коротких волн; *е* — дроссель накала со стальным сердечником; *ж* — дроссель для УКВ.

Для получения достаточной индуктивности при малых диаметрах дросселя необходимо намотку вести тонким проводом диаметром от 0,05 до 0,2 *мм*. Длина намотки берется в пределах от двух до четырех диаметров $D$ каркаса. Катушки короче $2D$ имеют недотаточную индуктивность, а катушки длиннее $4D$ имеют значительную собственную емкость.

Расчет дросселей высокой частоты заключается в определении индуктивности, собственной емкости и сопротивления. Формулы для

расчета дросселей аналогичны формулам для расчета катушек индуктивности.

Для определения числа витков дросселей УКВ можно воспользоваться графиками, представленными на рис. 72, где график *I* отно-

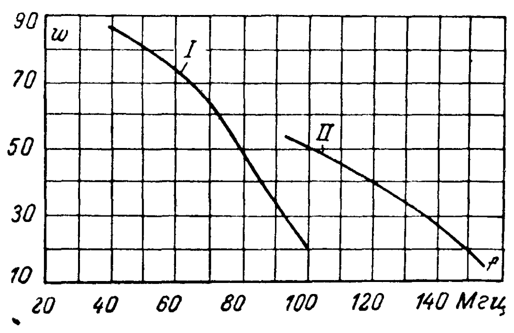



Рис. 72. Графики для расчета дросселей УКВ.

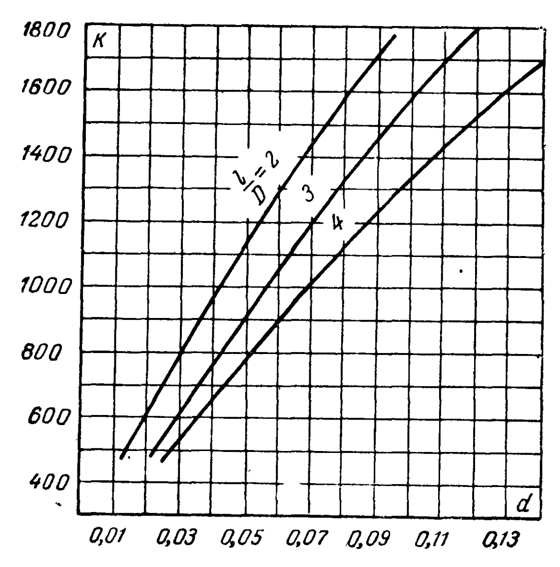



Рис. 73. График для определения коэффициента *k*.

сится к дросселю с диаметром намотки 10 и длиной 20 *мм*, а график *II* — к дросселю с диаметром намотки 5,5 и длиной 12 *мм*. Диаметр провода в обоих случаях 0,17 *мм*.

На рис. 73 показан график для расчета дросселей на частоты от 30 до 1 000 *Мгц*. По графику определяется вспомогательный коэф-

$f_0$, Мгц
0,1
0,2
0,4
0,5
1
2
4
6
10
20
40
60
100
200

$R_{макс}$, ом
10
15
20
30
40
60
80
100

$L_{др.н}$ мкгн
1000
600
400
200
100
60
40
20
10
6
4
2
1
0,6
0,4
0,2
0,1

M
дб | отн
40 | 100
60
40
30
20
20 | 10
6
4
10
2
0 | 1

Вспомогательная ось

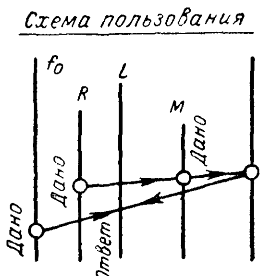



Рис. 74. Номограмма для расчета дросселей накала.

фициент $k$, который связывает значение диаметра провода и конструктивные размеры дросселя соотношением длины намотки к диаметру намотки $l/D=2$; 3; 4. Диаметр каркаса определяется рабочей частотой дросселя, т. е.

$$D=\sqrt{\frac{k}{f}},$$

где $D$ — диаметр каркаса дросселя, *мм*;

$f$ — частота, для которой рассчитывается дроссель, *Мгц*.

Индуктивность дросселей питания ориентировочно можно выбрать по табл. 27. Меньшие значения индуктивности относятся к дросселям накала ламп.

Таблица 27

**Индуктивность дросселей питания**

| $f$, *Мгц* . . . . | До 0,5 | 1 | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|
| $L_{др}$, *мкгн* . . . | $(1\div10)\cdot10^3$ | 250—1500 | 80—400 | 30—150 | 15—80 |

*Продолжение табл. 27*

| $f$, *Мгц* . . . . | 50 | 100 | 200 | 500 |
|---|---|---|---|---|
| $L_{др}$, *мкгн* . . . | 4—24 | 1,7—8 | 0,6—2,5 | 0,15—0,4 |

На рис. 74 показана номограмма для расчета дросселей накала. Величина $R_н$ равна:

$$R_н=\frac{U_н}{I_н},$$

где $U_н$ и $I_н$ — напряжение и ток накала.

Величина $M$ показывает относительное ограничение токов высокой частоты.

## Катушки индуктивности с сердечниками из ферромагнитных материалов

В цепях низких частот большое применение находят катушки с индуктивностью порядка единиц, десятков и даже сотен генри. Для этих катушек используют сердечники с замкнутой магнитной цепью из ферромагнитных материалов. К таким материалам относятся: электротехническая сталь, пермаллой, пермендюр и др. Некоторые свойства ферромагнитных материалов приведены в табл. 28.

Характерной особенностью катушек с ферромагнитными сердечниками является зависимость их индуктивности от величины переменного напряжения на обмотках, его частоты и тока постоянного подмагничивания.

Магнитные материалы характеризуются значительным числом параметров, однако на параметры катушек наибольшее влияние оказывает магнитная проницаемость материала.

Таблица 28

**Некоторые свойства магнитных материалов**

| Наименование и марка материала | Толщина, *мм* | Магнитная проницаемость | | Индукция насыщения $B_{макс}$, *тл* |
|---|---|---|---|---|
| | | $\mu_0$ | $\mu_{макс}$ | |
| Электротехническая сталь | | | | |
| Э41, Э42 | 0,3—0,5 | 350—400 | | |
| Э44 | 0,1—0,2 | До 500 | | |
| Э46, Э48 | 0,35 | До 300 | 6 000—7 000 | 1,8—2,0 |
| Э310 | 0,2—0,5 | До 500 | | |
| Пермаллой | | | | |
| 80НХС | 0,05—0,15 | 18 000—25 000 | 40 000—70 000 | 0,7—0,75 |
| | 0,18—0,4 | 25 000—35 000 | | |
| 79НМ | 0,02 | 18 000—20 000 | 80 000—150 000 | 0,7—0,75 |
| 50НХС | 0,05—0,15 | 1 600—2 500 | 11 000—14 000 | 1,0 |
| 45Н | 0,05—0,15 | 1 700—2 500 | 15 000 | 1,5 |
| Пермендюр | 0,2—0,5 | 700—1 100 | 4 000 | 2,2—2,4 |

Магнитная проницаемость определяется отношением переменных составляющих индукции и напряженности магнитного поля. Ее величина в слабых полях называется начальной магнитной проницаемостью $\mu_0$. С увеличением индукции проницаемость повышается до определенного предела $\mu_{макс}$, определяемого свойствами магнитного материала. При дальнейшем увеличении индукции проницаемость резко падает. Проницаемость при постоянном подмагничивании характеризуется динамической проницаемостью $\mu_д$.

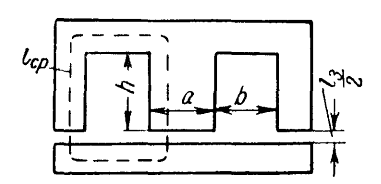



Рис. 75. Длина магнитного пути в Ш-образном сердечнике.

Индуктивность катушки, имеющей замкнутый сердечник, определяется по формуле

$$L = \frac{1{,}26 w^2 S_с \mu_0}{l_{ср}} 10^{-8},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*;

$w$ — число витков;

$S_с$ — сечение сердечника, *см*²;

$\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость материала сердечника;

$l_{ср}$ — средняя длина магнитной линии магнитопровода, *см*.

Средняя длина магнитной линии магнитопровода с равномерным сечением (рис. 75) равна:

$$l_{ср} = 2\left(b + h + \frac{\pi a}{4}\right).$$

Формула для расчета величины индуктивности дает точные результаты лишь в том случае, когда по обмотке катушки не протекает постоянный ток и индуктивность определяется для переменной составляющей с незначительной амплитудой.

Если в качестве сердечника катушки применяется сердечник из электротехнической стали, то основную формулу для расчета величины индуктивности можно представить в виде

$$L = \frac{w^2 S_c}{2 l_{ср}} 10^{-5}.$$

При расчете по этой формуле имеется в виду, что магнитная проницаемость материала сердечника равна 400 без тока подмагничивания. Число витков катушки при заданной индуктивности можно определить по упрощенной формуле

$$w = 450 \sqrt{\frac{L l_{ср}}{S_c}}.$$

При расчете числа витков для катушек, выполненных на сердечнике с магнитной проницаемостью, отличной от 400, формула имеет вид:

$$w = 8\,920 \sqrt{\frac{L l_{ср}}{\mu_0 S_c}},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*;
$l_{ср}$ — средняя длина магнитной линии магнитопровода, *см*;
$S_c$ — сечение сердечника, *см*$^2$;
$\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость.

Для упрощения расчетов на рис. 76 показан график расчета числа витков катушек при различных соотношениях $S_c/l_{ср}$.

Для расчета катушек с постоянным подмагничиванием предварительно определяется величина динамической магнитной проницаемости $\mu_д$. При определении динамической магнитной проницаемости необходимо вычислить амплитуду индукции $B_m$ и постоянные ампервитки $(aw)_0$.

Амплитуда индукции равна

$$B_m = \frac{U \cdot 10^4}{4{,}44 S_c f w},$$

где $B_m$ — амплитуда индукции, *тл*;
$U$ — переменное напряжение на обмотке, *в*;
$f$ — частота, *гц*;
$S_c$ — сечение сердечника, *см*$^2$.

Постоянная составляющая напряженности магнитного поля равна:

$$H_0 = 4\pi \frac{w I_0}{l_{ср}} = 4\pi (aw)_0,$$

т. е. она пропорциональна величине

$$(aw)_0 = \frac{w I_0}{l_{ср}},$$

где $I_0$ — ток подмагничивания, *а*.

Величина $(aw)_0$ называется постоянными ампер-витками на сантиметр и удобна для расчетов, так как поддается непосредственному вычислению.

На рис. 77 показан график для определения динамической проницаемости некоторых материалов в зависимости от $B_m$, а на рис. 78 — в зависимости от $(aw)_0$ и $B_m$.

Для уменьшения постоянной составляющей напряженности магнитного поля в сердечник вводится немагнитный зазор, который увеличивает сопротивление магнитной цепи.

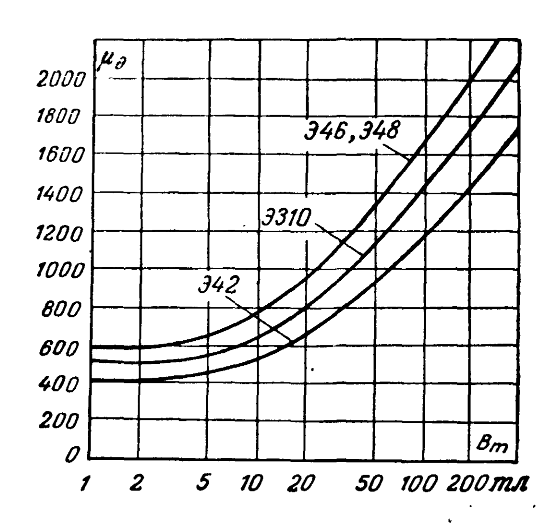



Рис. 77. График зависимости динамической магнитной проницаемости от индукции $B_m$.

Индуктивность катушки, в магнитопроводе которой имеется зазор $l_з$, будет равна:

$$L = \frac{1,26}{\frac{1}{\mu_0} + \frac{l_з}{l_{ср}}} \frac{w^2 S_c}{l_{ср}} \cdot 10^{-8}.$$

Если обозначить

$$\mu_э = \frac{1}{\frac{1}{\mu_0} + \frac{l_з}{l_{ср}}}$$

и назвать эту величину эквивалентной магнитной проницаемостью, то вычислять индуктивность можно по вышеприведенным формулам, заменив $\mu_0$ на $\mu_э$.

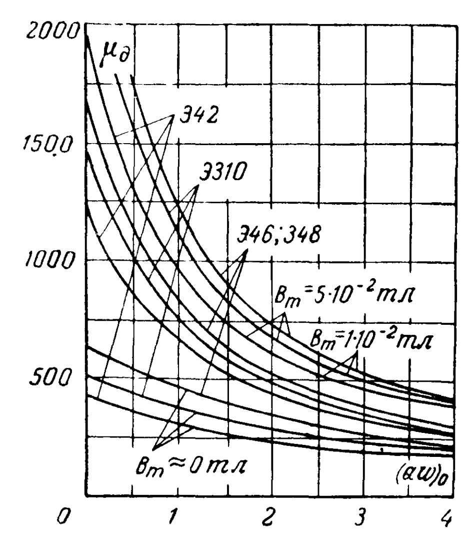



Рис. 78. График зависимости динамической магнитной проницаемости от индукции $B_m$ и постоянного подмагничивания $(aw)_0$.

Величина оптимального немагнитного зазора в сердечнике определяется по формуле

$$l_з = \frac{z l_{ср}}{100},$$

где $z$ — коэффициент, определяемый из графика на рис. 79.

Выбрать величину немагнитного зазора можно с помощью графика, показанного на рис. 80. Для вычисления $l_з$ по этому графику необходимо вычислить вспомогательную величину $k$, равную

$$k = \frac{L I_0^2}{V},$$

где $L$ — требуемая индуктивность катушки, *гн*;

$I_0$ — подмагничивающий ток, *ма*;

$V$ — объем сердечника, равный $S_c l_{ср}$, *см*³.

По полученному значению $k$ находят из кривой величину $l_з/l_{ср}$, после чего простым вычислением определяют величину $l_з$.

Толщина немагнитной прокладки при сердечнике Ш-образной формы выбирается равной $0{,}5 l_з$ и делается из любого изоляционного материала.

На рис. 81 показан график зависимости эквивалентной магнитной проницаемости некоторых магнитных материалов от постоянного подмагничивания при оптимальной величине немагнитного зазора.

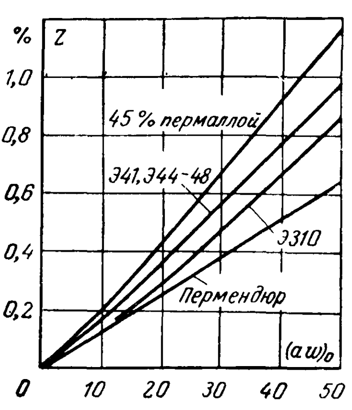



Рис. 79. График для определения коэффициента $z$.

Диаметр провода обмоток находится по формуле

$$d = 0{,}7 \sqrt{I_0},$$

где $d$ — диаметр провода, *мм*;

$I_0$ — ток подмагничивания, *а*.

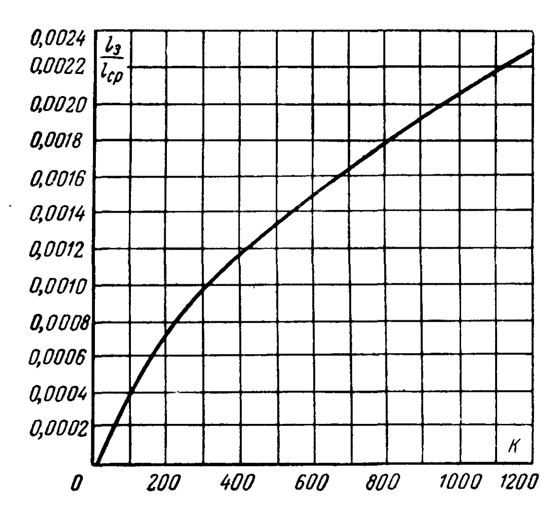



Рис. 80. График для определения величины немагнитного зазора.

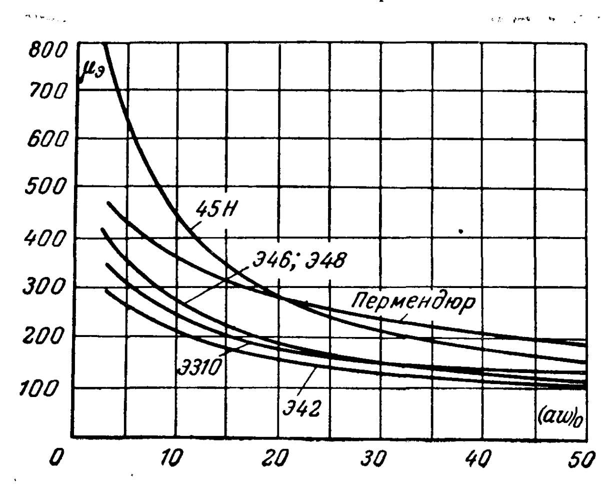



Рис. 81. График зависимости $\mu_э$ от постоянного подмагничивания при оптимальном зазоре.

## Соединение катушек индуктивности

На рис. 82 показано последовательное соединение катушек индуктивности. Общая индуктивность цепи без учета взаимной индуктивности между ними равна

$$L_{общ} = L_1 + L_2 + L_3;$$

с учетом взаимной индуктивности (рис. 82,*б*)

$$L_{общ}=L_1+L_2\pm 2M,$$

где $M$ — взаимная индуктивность, причем верхний знак берется при согласованном, а нижний — при встречном включениях.

При параллельном соединении катушек индуктивности общая индуктивность равна:

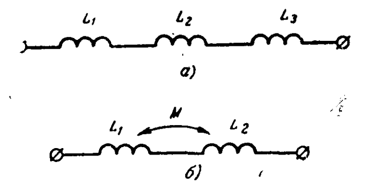



Рис. 82. Последовательное соединение катушек индуктивности.

*а* — без индуктивной связи между ними; *б* — при индуктивной связи между ними.

Рис. 83. Параллельное соединение катушек индуктивности.

*а* — без индуктивной связи между ними; *б* — при индуктивной связи между ними.

без учета взаимной индуктивности (рис. 83,*а*)

$$\frac{1}{L_{общ}}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3};$$

с учетом взаимной индуктивности (рис. 83, *б*)

$$L_{общ}=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2\pm 2M}.$$

Общая индуктивность двух параллельно соединенных катушек (при $M=0$) равна:

$$L_{общ}=\frac{L_1L_2}{L_1+L_2}.$$

На рис. 84 показана номограмма для определения общей индуктивности двух параллельно соединенных катушек. При вычислениях по номограмме величины $L_1$ и $L_2$ следует брать в одинаковых единицах.

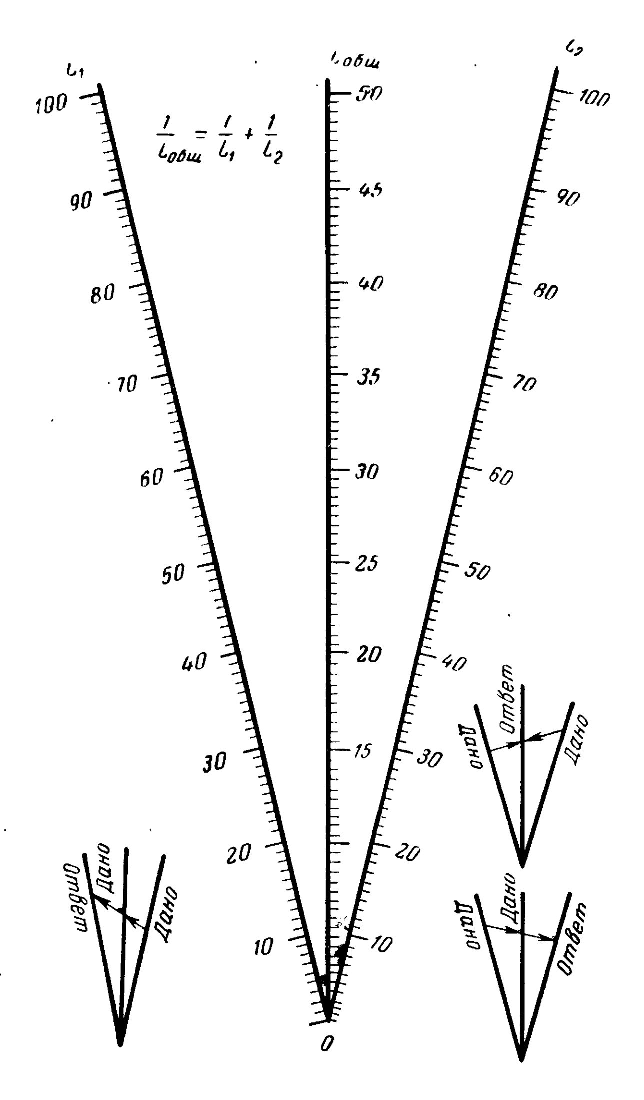



Рис. 84. Номограмма для определения общей индуктивности двух параллельно соединенных катушек.

*Глава третья*

# РАСЧЕТ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

## Основные параметры колебательных контуров

Простейший колебательный контур представляет собой последовательное или параллельное соединение двух реактивных сопротивлений противоположного знака: индуктивного $X_L$ и емкостного $X_C$.

Реактивное сопротивление катушки индуктивности $X_L$ увеличивается прямо пропорционально, а реактивное сопротивление конденсатора $X_C$ — обратно пропорционально частоте

$$X_L = 2\pi fL, \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

где $X_L$ и $X_C$ — реактивные сопротивления, *ом*;

$f$ — частота, *гц*;

$L$ — индуктивность катушки, *гн*;

$C$ — емкость конденсатора, *ф*.

Резонансной частотой $f_0$ колебательного контура называется частота, на которой индуктивное сопротивление численно равно емкостному:

$$X_L = -X_C.$$

Значение индуктивного или емкостного сопротивления контура на резонансной частоте называют характеристическим (волновым) сопротивлением

$$\rho = X_L = X_C = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Из приведенного выше равенства следует:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad \text{или} \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

откуда выводится основная формула для определения резонансной частоты колебательного контура

$$f_0^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

На практике встречаются видоизменения записи этой формулы для радиочастот

$$f_{(кгц)} = \frac{1}{6,28\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}}; \qquad f_{(гц)} = \frac{159}{\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}};$$

$$f_{(гц)} = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(мгн)}C_{(мкф)}}}; \qquad f_{(кгц)} = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(мгн)}C_{(пф)}}};$$

$$f_{(Мгц)} = \frac{25\,330}{\sqrt{L_{(мкгн)}C_{(пф)}}}; \qquad \omega_0 = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}}.$$

Чтобы уменьшить резонансную частоту контура в два раза, необходимо увеличить в четыре раза емкость или индуктивность кон-

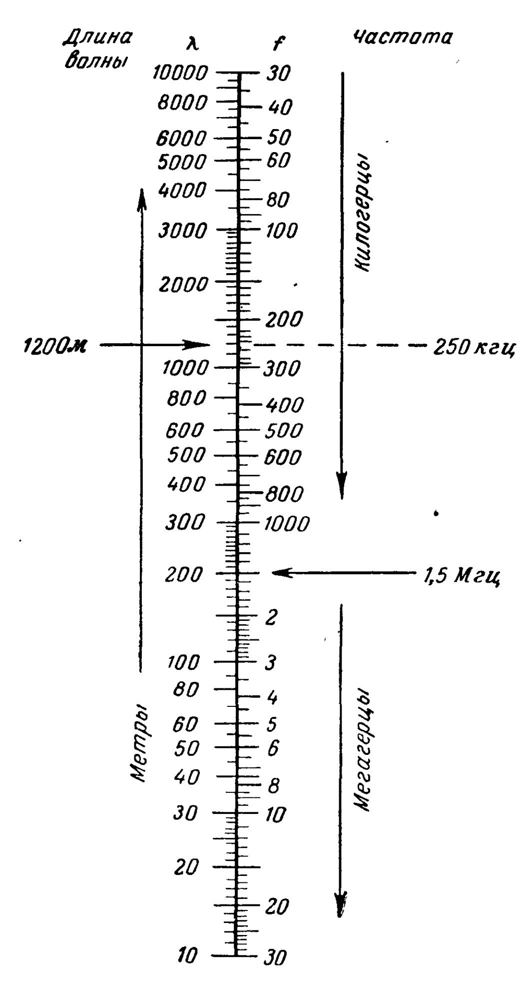



Рис. 85. График для определения длины волны и частоты электрических колебаний.

Таблица 29

## Расчет частоты $f_0$, индуктивности $L$ и емкости $C$

| *N* *f, L, C* | *L* и *C*, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м | *N* *f, L, C* | *L* и *C*, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1,0 | 159 000 | 1,89 | 47 | 76,0 | 18 200 | 16,5 |
| 1 | 1,10 | 152 000 | 1,97 | 48 | 83,0 | 17 500 | 17,1 |
| 2 | 1,20 | 145 000 | 2,07 | 49 | 91,0 | 16 700 | 18,0 |
| 3 | 1,30 | 140 000 | 2,14 | 50 | 100 | 15 900 | 18,9 |
| 4 | 1,45 | 133 000 | 2,30 | 51 | 110 | 15 200 | 19,7 |
| 5 | 1,60 | 126 000 | 2,38 | 52 | 120 | 14 500 | 20,7 |
| 6 | 1,75 | 121 000 | 2,48 | 53 | 130 | 14 000 | 21,4 |
| 7 | 1,90 | 115 000 | 2,61 | 54 | 145 | 13 300 | 23,0 |
| 8 | 2,10 | 110 000 | 2,73 | 55 | 160 | 12 600 | 23,8 |
| 9 | 2,130 | 105 000 | 2,86 | 56 | 175 | 12 100 | 24,8 |
| 10 | 2,50 | 101 000 | 2,97 | 57 | 190 | 11 500 | 26,1 |
| 11 | 2,75 | 95 800 | 3,13 | 58 | 210 | 11 000 | 27,3 |
| 12 | 3,00 | 92 000 | 3,26 | 59 | 230 | 10 500 | 28,6 |
| 13 | 3,30 | 87 400 | 3,43 | 60 | 250 | 10 100 | 29,7 |
| 14 | 3,65 | 83 300 | 3,60 | 61 | 275 | 9 580 | 31,3 |
| 15 | 4,09 | 79 600 | 3,77 | 62 | 300 | 9 200 | 32,6 |
| 16 | 4,35 | 76 100 | 3,94 | 63 | 330 | 8 740 | 34,3 |
| 17 | 4,80 | 72 000 | 4,13 | 64 | 365 | 8 330 | 36,0 |
| 18 | 5,25 | 69 500 | 4,32 | 65 | 400 | 7 960 | 37,7 |
| 19 | 5,75 | 66 300 | 4,52 | 66 | 435 | 7 610 | 39,4 |
| 20 | 6,30 | 63 400 | 4,73 | 67 | 480 | 7 260 | 41,3 |
| 21 | 6,90 | 60 500 | 4,96 | 68 | 525 | 6 950 | 43,2 |
| 22 | 7,60 | 57 600 | 5,21 | 69 | 575 | 6 630 | 45,2 |
| 23 | 8,30 | 55 200 | 5,43 | 70 | 630 | 6 340 | 47,3 |
| 24 | 9,10 | 52 700 | 5,69 | 71 | 690 | 6 050 | 49,6 |
| 25 | 10,0 | 50 300 | 5,96 | 72 | 760 | 5 760 | 52,1 |
| 26 | 11,0 | 47 900 | 6,26 | 73 | 830 | 5 520 | 54,3 |
| 27 | 12,0 | 46 000 | 6,52 | 74 | 910 | 5 210 | 56,9 |
| 28 | 13,0 | 44 100 | 6,80 | 75 | 1 000 | 5 030 | 59,6 |
| 29 | 14,5 | 41 800 | 7,18 | 76 | 1 100 | 4 790 | 62,6 |
| 30 | 16,0 | 39 800 | 7,54 | 77 | 1 200 | 4 600 | 65,2 |
| 31 | 17,5 | 38 100 | 7,87 | 78 | 1 300 | 4 410 | 68,0 |
| 32 | 19,0 | 36 500 | 8,22 | 79 | 1 450 | 4 180 | 71,8 |
| 33 | 21,0 | 34 700 | 8,65 | 80 | 1 600 | 3 980 | 75,4 |
| 34 | 23,0 | 33 100 | 9,06 | 81 | 1 750 | 3 810 | 78,9 |
| 35 | 25,0 | 31 800 | 9,43 | 82 | 1 900 | 3 650 | 82,2 |
| 36 | 27,5 | 30 400 | 9,87 | 83 | 2 100 | 3 470 | 86,5 |
| 37 | 30,0 | 29 200 | 10,3 | 84 | 2 300 | 3 310 | 90,6 |
| 38 | 33,0 | 27 700 | 10,8 | 85 | 2 500 | 3 180 | 94,3 |
| 39 | 36,5 | 26 300 | 11,4 | 86 | 2 750 | 3 040 | 98,7 |
| 40 | 40,0 | 25 200 | 11,9 | 87 | 3 000 | 2 920 | 103 |
| 41 | 43,5 | 24 100 | 12,4 | 88 | 3 300 | 2 770 | 108 |
| 42 | 48,0 | 23 000 | 13,0 | 89 | 3 650 | 2 630 | 114 |
| 43 | 52,5 | 21 900 | 13,7 | 90 | 4 000 | 2 520 | 119 |
| 44 | 57,5 | 21 100 | 14,2 | 91 | 4 350 | 2 410 | 124 |
| 45 | 63,0 | 20 000 | 15,1 | 92 | 4 800 | 2 300 | 130 |
| 46 | 69,0 | 19 000 | 15,7 | 93 | 5 250 | 2 190 | 137 |

| N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м | N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 94 | 5 750 | 2 110 | 142 | 135 | 250 000 | 318 | 943 |
| 95 | 6 300 | 2 000 | 150 | 136 | 275 000 | 304 | 987 |
| 96 | 6 900 | 1 910 | 157 | 137 | 300 000 | 292 | 1 030 |
| 97 | 7 600 | 1 820 | 165 | 138 | 330 000 | 277 | 1 080 |
| 98 | 8 300 | 1 750 | 171 | 139 | 365 000 | 263 | 1 140 |
| 99 | 9 100 | 1 610 | 180 | 140 | 400 000 | 252 | 1 190 |
| 100 | 10 000 | 1 590 | 189 | 141 | 435 000 | 241 | 1 240 |
| 101 | 11 000 | 1 520 | 197 | 142 | 480 000 | 230 | 1 300 |
| 102 | 12 000 | 1 450 | 207 | 143 | 525 000 | 219 | 1 370 |
| 103 | 13 000 | 1 400 | 214 | 144 | 575 000 | 211 | 1 420 |
| 104 | 14 500 | 1 330 | 230 | 145 | 630 000 | 200 | 1 500 |
| 105 | 16 000 | 1 260 | 238 | 146 | 690 000 | 191 | 1 570 |
| 106 | 17 500 | 1 210 | 248 | 147 | 760 000 | 182 | 1 650 |
| 107 | 19 000 | 1 150 | 261 | 148 | 830 000 | 175 | 1 710 |
| 108 | 21 000 | 1 100 | 273 | 149 | 910 000 | 167 | 1 800 |
| 109 | 23 000 | 1 050 | 286 | 150 | 1 000 000 | 159 | 1 890 |
| 110 | 25 000 | 1 010 | 297 | 151 | 1 100 000 | 152 | 1 970 |
| 111 | 27 500 | 958 | 313 | 152 | 1 200 000 | 145 | 2 070 |
| 112 | 30 000 | 920 | 326 | 153 | 1 300 000 | 140 | 2 140 |
| 113 | 33 000 | 874 | 343 | 154 | 1 450 000 | 133 | 2 300 |
| 114 | 36 500 | 833 | 360 | 155 | 1 600 000 | 126 | 2 380 |
| 115 | 40 000 | 796 | 377 | 156 | 1 750 000 | 121 | 2 480 |
| 116 | 43 500 | 761 | 394 | 157 | 1 900 000 | 115 | 2 610 |
| 117 | 48 000 | 726 | 413 | 158 | 2 100 000 | 110 | 2 730 |
| 118 | 52 500 | 695 | 432 | 159 | 2 300 000 | 105 | 2 860 |
| 119 | 57 500 | 663 | 452 | 160 | 2 500 000 | 101 | 2 970 |
| 120 | 63 000 | 634 | 473 | 161 | 2 750 000 | 95,8 | 3 130 |
| 121 | 69 000 | 605 | 496 | 162 | 3 000 000 | 92,0 | 3 260 |
| 122 | 76 000 | 576 | 521 | 163 | 3 300 000 | 87,4 | 3 430 |
| 123 | 83 000 | 552 | 543 | 164 | 3 650 000 | 83,3 | 3 600 |
| 124 | 91 000 | 527 | 569 | 165 | 4 000 000 | 79,6 | 3 770 |
| 125 | 100 000 | 593 | 596 | 166 | 4 350 000 | 76,1 | 3 940 |
| 126 | 110 000 | 579 | 626 | 167 | 4 800 000 | 72,6 | 4 130 |
| 127 | 120 000 | 460 | 656 | 168 | 5 250 000 | 69,5 | 4 320 |
| 128 | 130 000 | 441 | 680 | 169 | 5 750 000 | 66,3 | 4 520 |
| 129 | 145 000 | 418 | 718 | 170 | 6 300 000 | 63,4 | 4 730 |
| 130 | 160 000 | 398 | 754 | 171 | 6 900 000 | 60,5 | 4 960 |
| 131 | 175 000 | 381 | 787 | 172 | 7 600 000 | 57,6 | 5 210 |
| 132 | 190 000 | 365 | 822 | 173 | 8 300 000 | 55,2 | 5 430 |
| 133 | 210 000 | 347 | 865 | 174 | 9 100 000 | 52,7 | 5 590 |
| 134 | 230 000 | 331 | 906 | | | | |

тура. Можно увеличить емкость в два раза, одновременно увеличив в два раза индуктивность. Одну и ту же резонансную частоту можно получить при разных значениях емкости и индуктивности, для этого необходимо, чтобы произведение *LC* оставалось неизменным. Характеристическое сопротивление при этом изменится.

Таблица 30

**Частота в килогерцах для различных** *LC*

| *L*, *мкгн* | Емкость, *пф* | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
| 1 | 15 800 | 11 100 | 9 100 | 7 900 | 7 150 | 6 503 | 6 000 | 5 670 | 5 270 | 5 000 |
| 2 | 11 100 | 9 100 | 6 503 | 5 670 | 5 000 | 4 620 | 4 230 | 4 000 | 3 760 | 3 580 |
| 3 | 9 100 | 6 503 | 5 270 | 4 620 | 4 110 | 3 760 | 3 490 | 3 260 | 3 060 | 2 920 |
| 4 | 7 900 | 5 670 | 4 620 | 4 000 | 3 580 | 3 260 | 3 000 | 2 800 | 2 660 | 2 510 |
| 5 | 7 150 | 5 000 | 4 110 | 3 580 | 3 200 | 2 920 | 2 680 | 2 510 | 2 380 | 2 260 |
| 6 | 6 503 | 4 620 | 3 760 | 3 260 | 2 920 | 2 660 | 2 460 | 2 290 | 2 160 | 2 060 |
| 7 | 6 000 | 4 230 | 3 490 | 3 000 | 2 680 | 2 460 | 2 280 | 2 120 | 2 000 | 1 900 |
| 8 | 5 670 | 4 000 | 3 260 | 2 800 | 2 510 | 2 290 | 2 120 | 1 985 | 1 875 | 1 775 |
| 9 | 5 270 | 3 760 | 3 060 | 2 660 | 2 380 | 2 160 | 2 000 | 1 875 | 1 761 | 1 655 |
| 10 | 5 000 | 3 580 | 2 920 | 2 510 | 2 260 | 2 060 | 1 900 | 1 775 | 1 655 | 1 595 |
| 12 | 4 620 | 3 260 | 2 660 | 2 290 | 2 060 | 1 875 | 1 730 | 1 620 | 1 530 | 1 455 |
| 14 | 4 230 | 3 000 | 2 460 | 2 120 | 1 900 | 1 730 | 1 610 | 1 510 | 1 410 | 1 342 |
| 16 | 4 000 | 2 800 | 2 290 | 1 985 | 1 775 | 1 620 | 1 510 | 1 430 | 1 327 | 1 260 |
| 18 | 3 760 | 2 660 | 2 160 | 1 875 | 1 655 | 1 530 | 1 410 | 1 327 | 1 250 | 1 185 |
| 20 | 3 580 | 2 510 | 2 060 | 1 775 | 1 595 | 1 435 | 1 342 | 1 260 | 1 185 | 1 122 |
| 25 | 3 200 | 2 260 | 1 840 | 1 595 | 1 420 | 1 298 | 1 205 | 1 122 | 1 060 | 1 003 |
| 30 | 2 920 | 2 060 | 1 655 | 1 455 | 1 298 | 1 185 | 1 080 | 1 028 | 968 | 921 |
| 40 | 2 510 | 1 775 | 1 455 | 1 260 | 1 122 | 1 082 | 954 | 893 | 840 | 796 |
| 50 | 2 260 | 1 595 | 1 298 | 1 122 | 1 003 | 921 | 850 | 796 | 750 | 712 |
| 60 | 2 060 | 2 455 | 1 185 | 1 028 | 921 | 840 | 778 | 728 | 685 | 650 |
| 70 | 1 948 | 1 342 | 1 100 | 954 | 850 | 778 | 720 | 674 | 634 | 602 |
| 80 | 1 775 | 1 260 | 1 028 | 893 | 841 | 728 | 689 | 630 | 593 | 563 |
| 90 | 1 655 | 1 185 | 968 | 840 | 750 | 685 | 635 | 593 | 560 | 532 |
| 100 | 1 595 | 1 122 | 921 | 896 | 712 | 650 | 613 | 563 | 532 | 502 |
| 120 | 1 455 | 1 028 | 840 | 728 | 650 | 593 | 550 | 514 | 485 | 460 |
| 140 | 1 342 | 954 | 778 | 674 | 602 | 582 | 519 | 476 | 450 | 426 |
| 160 | 1 260 | 893 | 745 | 630 | 563 | 514 | 1 476 | 446 | 430 | 398 |
| 180 | 1 185 | 840 | 685 | 593 | 532 | 485 | 449 | 430 | 396 | 375 |
| 200 | 1 122 | 796 | 650 | 563 | 504 | 460 | 426 | 398 | 375 | 356 |
| 250 | 1 003 | 712 | 582 | 504 | 451 | 411 | 282 | 356 | 336 | 318 |
| 300 | 921 | 650 | 530 | 460 | 411 | 375 | 348 | 324 | 306 | 291 |
| 400 | 796 | 563 | 460 | 398 | 356 | 324 | 301 | 271 | 265 | 252 |
| 500 | 712 | 504 | 411 | 345 | 316 | 290 | 269 | 252 | 243 | 228 |
| 600 | 650 | 460 | 375 | 324 | 290 | 265 | 246 | 230 | 223 | 209 |
| 700 | 602 | 426 | 348 | 307 | 269 | 246 | 229 | 218 | 201 | 190 |

Зависимость между резонансной частотой $f_0$ контура и длиной волны выражается следующей формулой:

$$\lambda = \frac{c}{f_0},$$

где $\lambda$ — длина волны, *м*;

$f_0$ — частота, *гц*;

$c$ — скорость распространения электромагнитных колебаний, равная $3 \cdot 10^8$ *м/сек*.

На рис. 85 показан график для перевода длины волны в частоту и обратно.

Помимо приведенных формул, неизвестные значения $f_0$, $L$, $C$ и $\lambda$ могут быть найдены при помощи табл. 29. Таблица состоит из четырех граф:

$N$ — графа порядковых номеров;
$L$, $C$ — графа индуктивности и емкости контура;
$f_0$ — графа резонансной частоты контура;
$\lambda$ — графа длины волн.

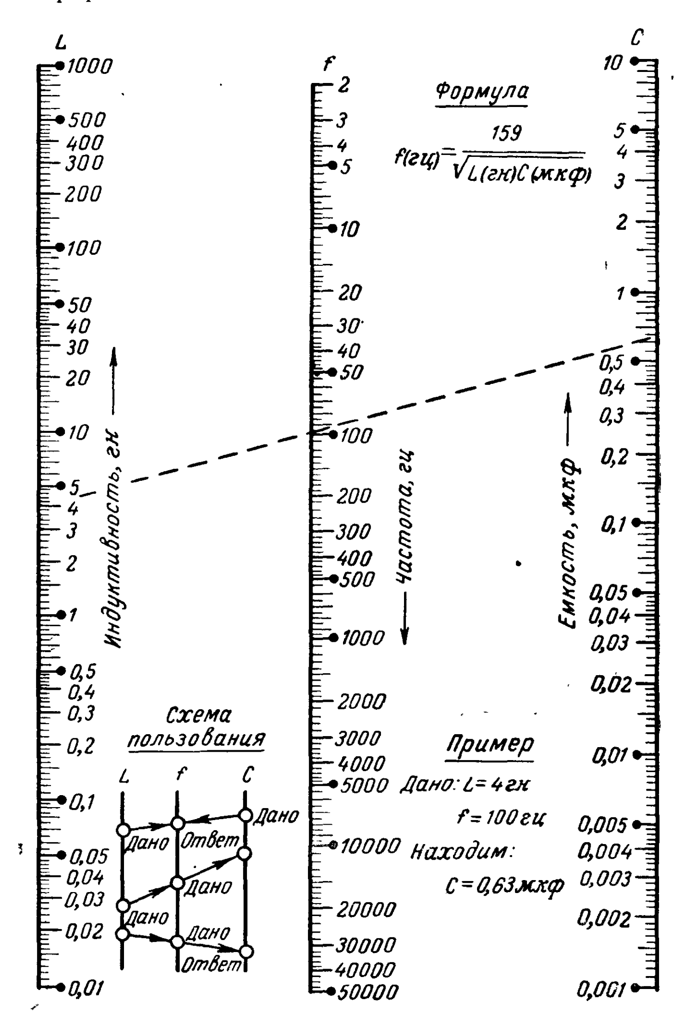



Рис. 86. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 2 *гц*—50 *кгц*.

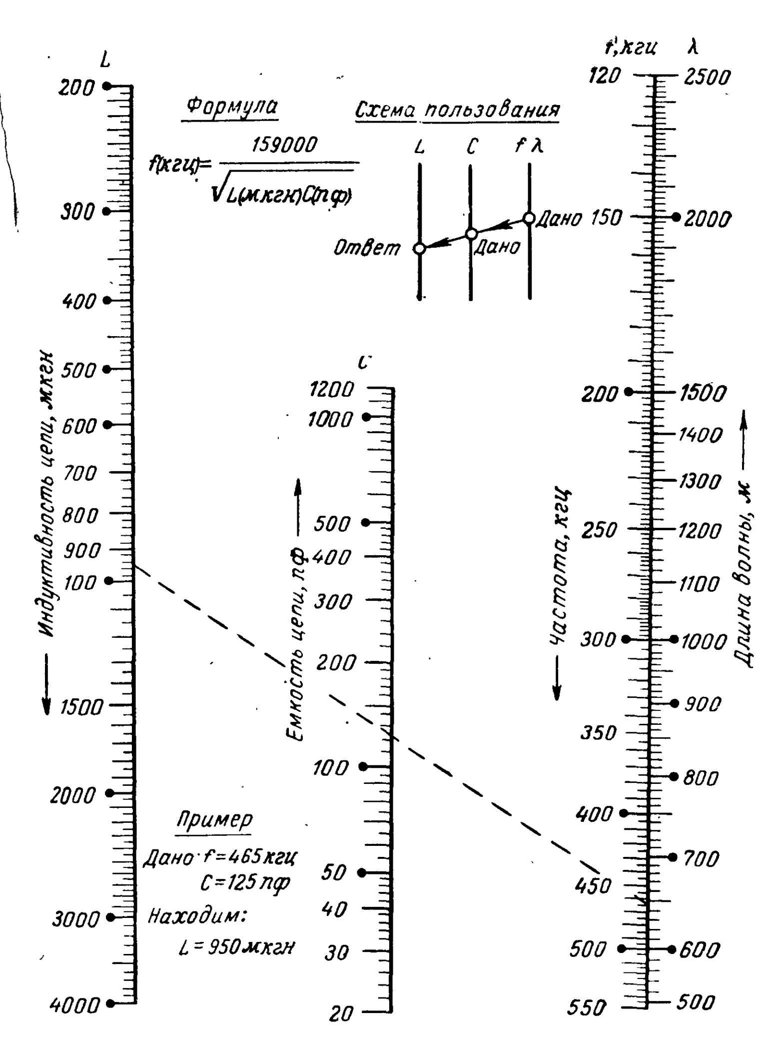



Рис. 87. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 120—550 *кгц*.

Расчет резонансной частоты контура $f_0$ по приведенной таблице сводится к сложению порядковых номеров строчек известной индуктивности и емкости. Сумма последних определяет номер строчки (графа $N$) с искомой частотой (графа $f_0$), т. е. $N_{f0}=N_C+$ $+N_L$.

Определение номера строки (графа $N$) с искомой индуктивностью или емкостью (графа $L$ или $C$) сводится к вычитанию по-

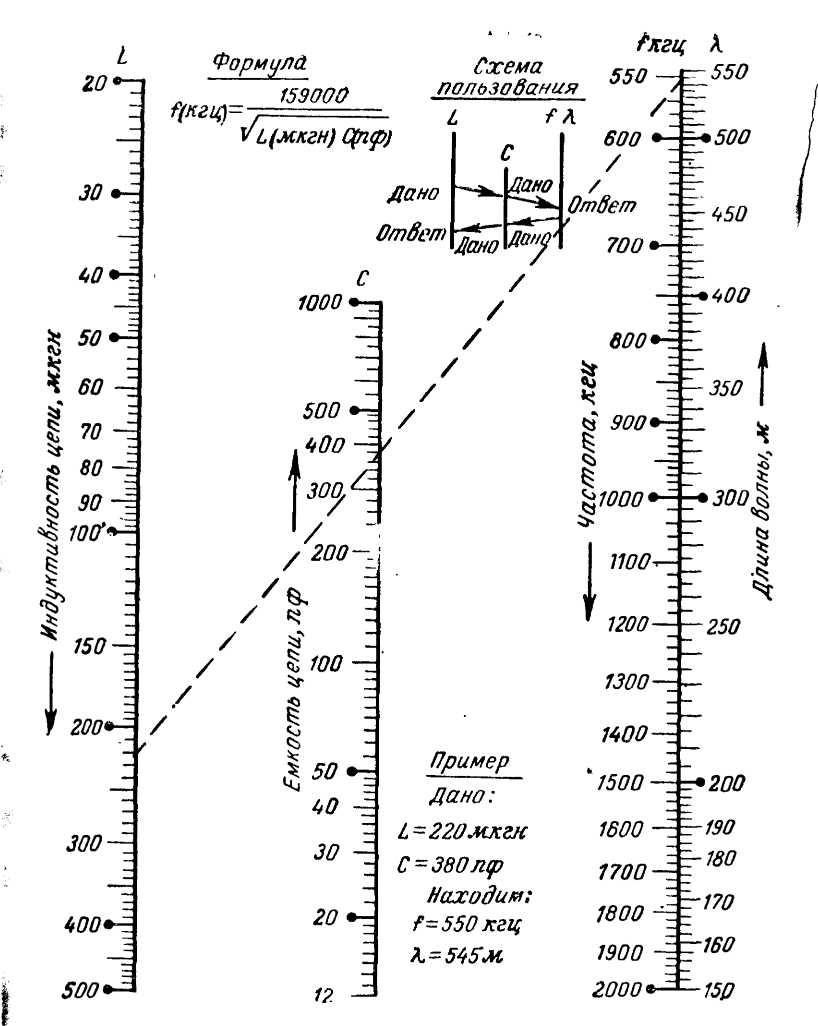



Рис. 88. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 550 *кгц*—2 *Мгц*.

рядкового номера емкости (или индуктивности) из порядкового номера известной частоты, т. е. $N_L = N_{f0} - N_C$ или $N_C = N_{f0} - N_L$.

Иногда может оказаться удобным вычислить необходимую величину емкости или индуктивности контура, не используя вспомогательную графу порядковых номеров. Для этого необходимо произведение *LC* разделить на заданную величину *L* (при определении *C*) или на заданную величину *C* (при определении *L*). В табл. 30 приведены значения резонансных частот контура при различных *LC*.

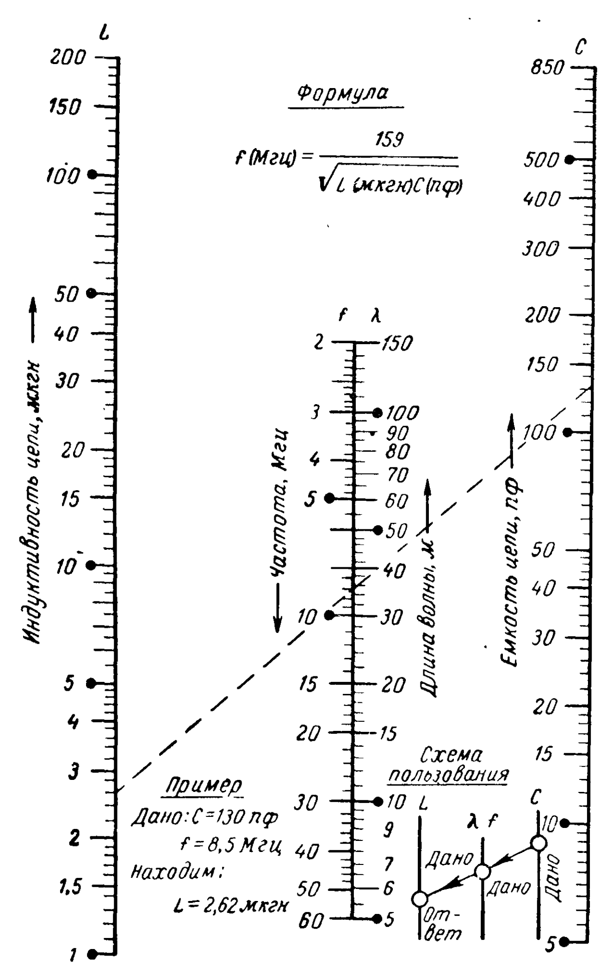
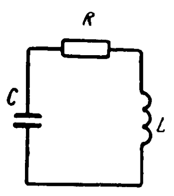


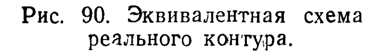

Рис. 89. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 2—60 *Мгц*.

На рис. 86—89 показаны номограммы для расчета резонансной частоты контура $f_0$ при известных значениях индуктивности $L$ и емкости $C$. При заданном значении частоты контура и одного из его элементов $L$ или $C$ номограммы позволяют определять значения неизвестного элемента. Номограмма, показанная на рис. 86, относится к низким частотам, на рис. 87 — к диапазону длинных волн, на рис. 88 — к диапазону средних волн и на рис. 89 — к коротким и частично ультракоротким волнам.

Выше были определены параметры идеального контура, не имеющего потерь. Реальный контур состоит из катушки индуктив-

ности, конденсатора и активного сопротивления $R$ (рис. 90). Сопротивление $R$ не существует как отдельный элемент колебательного контура. Оно условно характеризует величину потерь в катушке индуктивности и конденсаторе и называется сопротивлением потерь. Причиной потерь энергии в колебательном контуре являются: активное сопротивление проводников, утечки в изоляции, потери на излучение и др. Учитывая, что потери в конденсаторах очень незначительны, считают, что сопротивление потерь $R$ сосредоточено в катушке индуктивности.





Рис. 90. Эквивалентная схема реального контура.

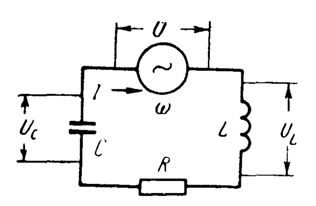



Рис. 91. Схема последовательного колебательного контура.

Резонансная частота, определяемая для колебательного контура с активным сопротивлением потерь $R$, вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}.$$

Для частот выше 100 *кгц* эта формула имеет вид

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Величину затухания колебаний в контуре принято оценивать отношением активного сопротивления $R$ к характеристическому $\rho$

$$d = \frac{R}{\rho} = \frac{R}{2\pi f_0 L} = 2\pi f_0 CR.$$

Величина, обратная затуханию, называется добротностью контура и обозначается буквой $Q$;

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{2\pi f_0 L}{R}.$$

В зависимости от того, как включен источник высокочастотной э. д. с., колебательный контур может быть последовательным или параллельным.

## Последовательный колебательный контур

На рис. 91 показана схема последовательного колебательного контура, в котором источник э. д. с. включен последовательно с $L$ и $C$ контура. В этой цепи имеется активное сопротивление $R$ и общее

реактивное $X$, образованное емкостью $C$ и индуктивностью $L$, равное

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

Полное сопротивление $z$ цепи, состоящей из включенных последовательно реактивного $X$ и активного $R$, определяется по формуле

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Величина $z$ принимает минимальное значение, равное $R$, при том значении $\omega$, для которого $X=0$. Частота, на которой наблюдается

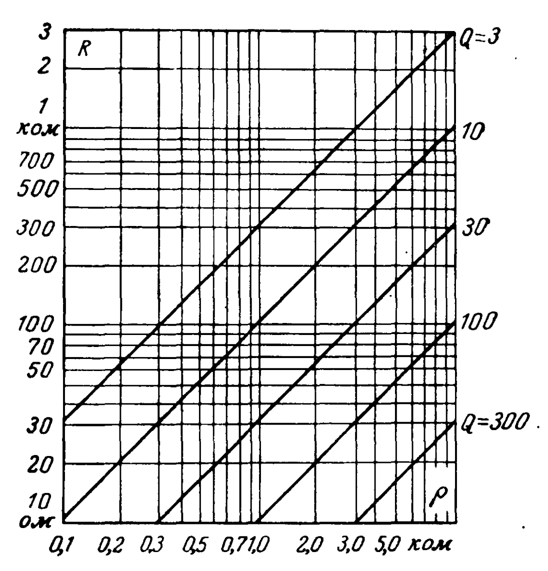



Рис. 92. Номограмма для определения резонансного сопротивления последовательного контура.

это явление, называется резонансной частотой последовательного контура и определяется из условия

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0; \quad \omega^2 = \frac{1}{LC},$$

т. е.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

В последовательном колебательном контуре наблюдается резонанс напряжений, т. е. напряжения на реактивных элементах кон-

тура равны по величине, в $Q$ раз больше подводимого от источника напряжения, но противоположны по знаку, вследствие чего их сумма равна нулю.

Добротность последовательного контура $Q$ показывает, во сколько раз активное сопротивление контура при резонансе меньше его характеристического сопротивления:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega C R}.$$

Величина $Q$ в основном определяется добротностью катушки индуктивности и может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен единиц. Чем меньше сопротивление потерь $R$, тем выше значение $Q$ и, следовательно, тем лучше резонансные свойства колебательного контура.

В радиолюбительских схемах величина характеристического сопротивления колебательных контуров лежит в пределах от 10 *ом* до 10 *ком*, а добротность в пределах от 3 до 300. На рис. 92 показана номограмма для определения сопротивления последовательного контура в зависимости от $Q$ и $\rho$.

Последовательный колебательный контур применяется главным образом для подавления или ослабления нежелательных частот, в цепях частотнозависимой обратной связи, а также в качестве междукаскадного согласующего устройства.

## Параллельный колебательный контур

На рис. 93 показана схема параллельного колебательного контура. Условия получения резонанса в параллельном колебательном контуре такие же, как и в последовательном. При резонансе эквивалентное сопротивление параллельного контура носит активный характер, максимально по величине и выражается следующим соотношением:

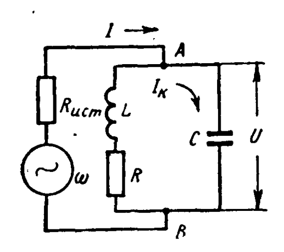



Рис. 93. Схема параллельного колебательного контура.

$$R_э = \frac{\rho^2}{R} = \frac{L}{RC} = Q\rho.$$

Добротность параллельного контура показывает, во сколько раз эквивалентное сопротивление контура больше его характеристического сопротивления

$$Q = \frac{R_э}{\rho}.$$

На рис. 94 показана номограмма для определения величины $R_э$ параллельного контура (сопротивление между точками $A$ и $B$) в зависимости от $Q$ и $\rho$, а на рис. 95 — номограмма, позволяющая определять величину $R_э$ при известных значениях $C$, $L$ и $R$.

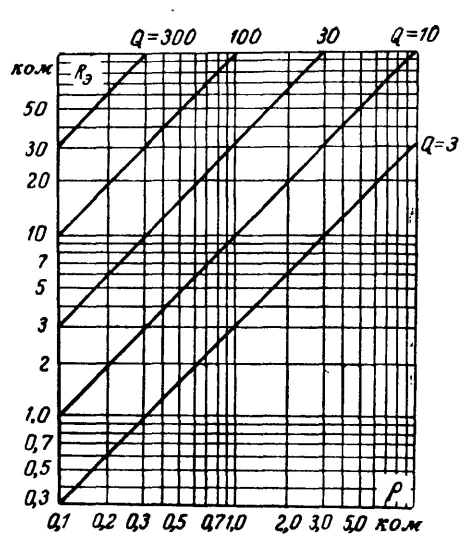



Рис. 94. Номограмма для определения резонансного эквивалентного сопротивления параллельного контура в зависимости от $\rho$ и $Q$.

На частотах, отличных от резонансной частоты контура, эквивалентное сопротивление параллельного контура падает. Если частота ниже резонансной, то эквивалентное сопротивление носит индуктивный характер; если частота выше резонансной, то эквивалентное сопротивление носит емкостный характер.

В параллельном колебательном контуре наблюдается резонанс токов, т. е. токи в реактивных сопротивлениях контура равны между собой по величине, в $Q$ раз больше тока, протекающего через источник э. д. с., но противоположны по знаку, вследствие чего их сумма равна нулю.

## Частотные характеристики одиночного колебательного контура

Колебательный контур пропускает колебания в пределах некоторой полосы частот, располагающейся по обе стороны от резонансной частоты $f_0$. Эта полоса называется полосой пропускания контура $П_{пр}$ и условно определяется по резонансной кривой на уровне 0,707 от максимального значения тока или напряжения, соответствующего резонансной частоте (рис. 96). Резонансной кривой колебательного контура называется графическое изображение его амплитудно-частотной характеристики.

Для одиночного последовательного колебательного контура полоса пропускания определяется по формуле

$$П_{пр} = df_0 = \frac{f_0}{Q} = 2\Delta f.$$

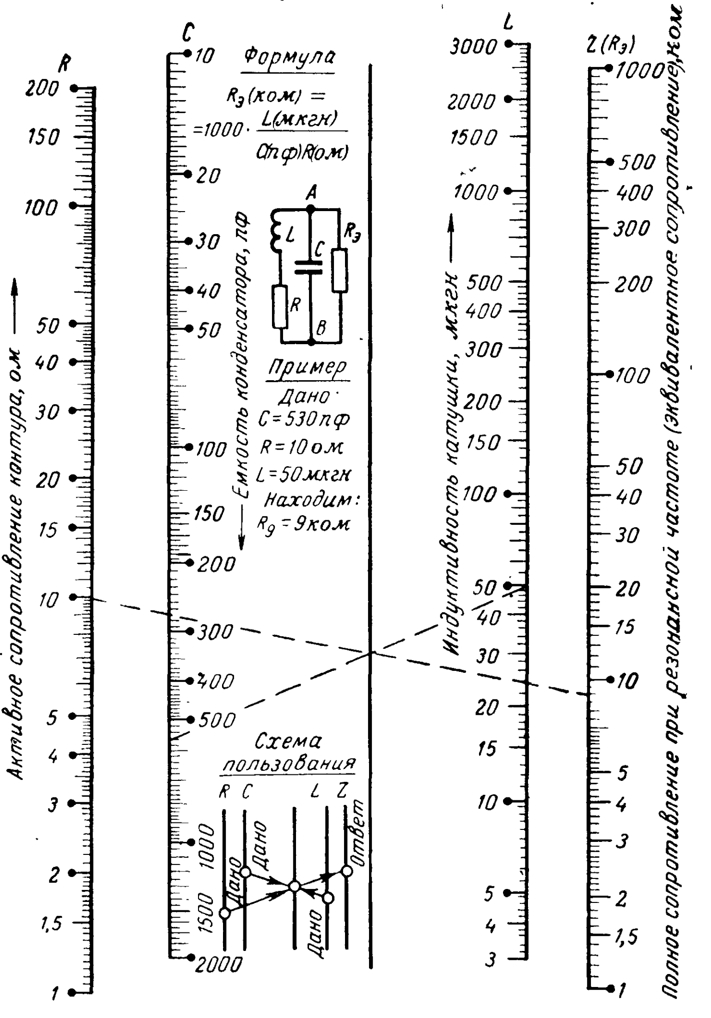



Рис. 95. Номограмма для определения эквивалентного резонансного сопротивления параллельного контура.

Для параллельного контура с учетом шунтирующего действия внешнего источника полоса пропускания равна:

$$П_{пр} = df_0 \left(1 + \frac{R_э}{R_{ист}}\right).$$

Для получения узкой полосы пропускания необходимо применять контур с высокой добротностью, а для получения широкой полосы

контур должен иметь низкую добротность. Результирующая добротность контура снижается, а полоса пропускания увеличивается при подключении параллельно контуру активного сопротивления $R_ш$, называемого шунтирующим (рис. 97). Это сопротивление вносит потери в общую цепь; чем меньше сопротивление $R_ш$, тем меньше результирующая добротность и тем больше затухание контура.

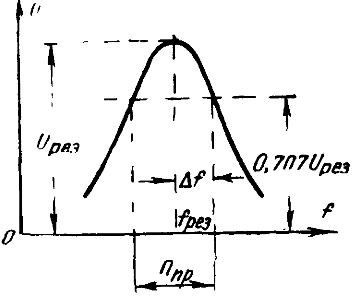



Рис. 96. Полоса пропускания контура.

Величина шунтирующего сопротивления, необходимая для получения заданной полосы пропускания, может быть найдена из выражения

$$R_ш = \frac{L}{C\left(\frac{\omega L}{Q} - R\right)}.$$

Действующая или результирующая добротность параллельного контура $Q_э$ с учетом влияния шунтирующего сопротивления $R_ш$ опре-

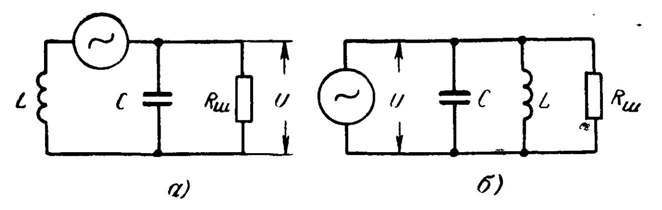



Рис. 97. Шунтирование контура активным сопротивлением.

деляется по формуле

$$Q_э = Q\frac{1}{1 + Q\frac{\rho}{R_ш}},$$

где $Q$ — добротность контура без учета влияния сопротивления $R_ш$;
$\rho$ — характеристическое сопротивление контура.

Необходимые значения индуктивности и емкости контура для получения заданной добротности находятся как

$$L = \frac{R_ш(Q - Q_э)}{\omega Q Q_э}; \quad C = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

Резонансная кривая колебательного контура описывается уравнением

$$\frac{U}{U_{\text{рез}}} = \frac{I}{I_{\text{рез}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta f}{f_0} Q\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{50} \Delta\%\right)^2}}.$$

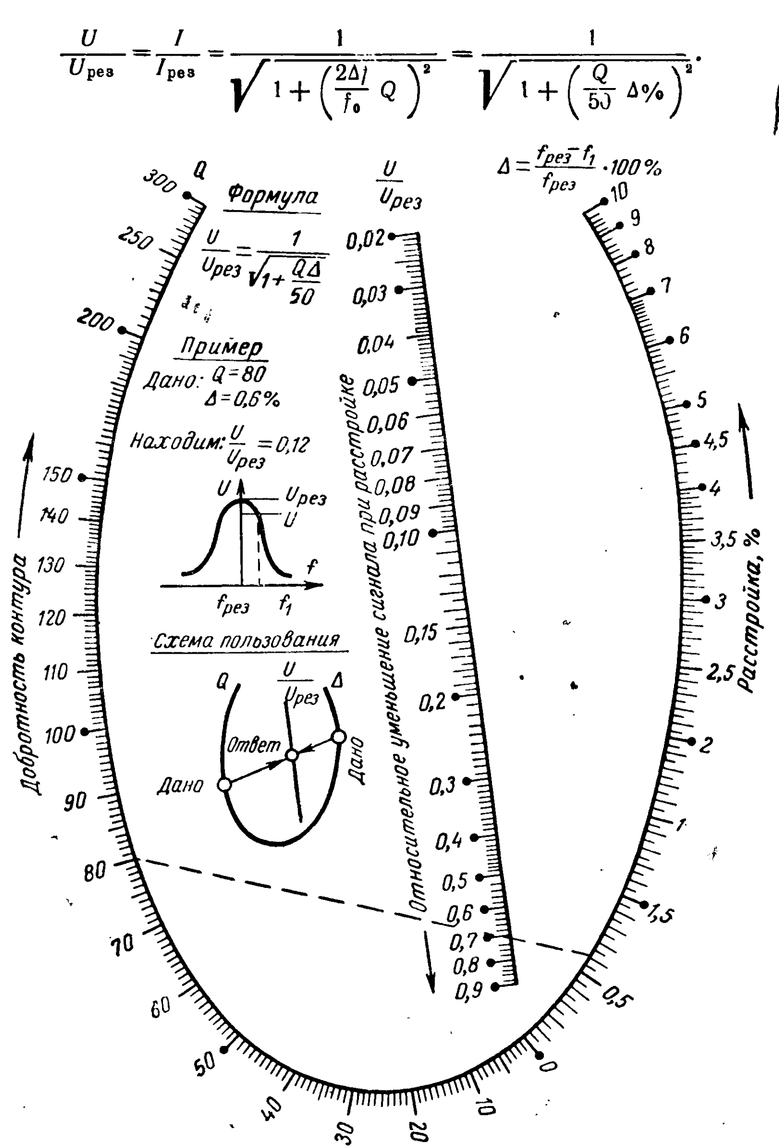



Рис. 98. Номограмма для определения ослабления сигнала, частота которого отличается от резонансной.

В этом уравнении отношения $U/U_{рез}$ и $I/I_{рез}$ показывают, какая часть максимально возможных (при резонансе) напряжений или токов получается при заданной расстройке Δ, которая определяется как

$$\frac{f - f_0}{f_0} 100,$$

где $f$ — частота действующей на контур э. д. с.;
$f_0$ — резонансная частота контура.

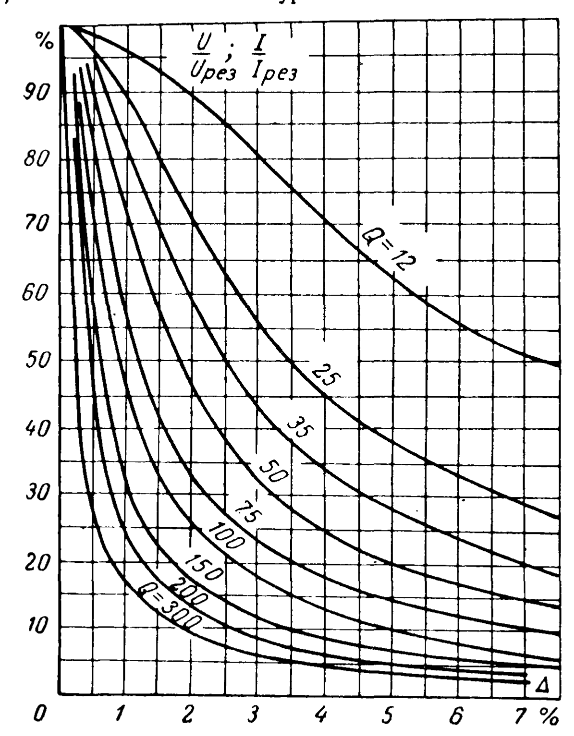



Рис. 99. Резонансные кривые последовательного контура в зависимости от $Q$ и процентной расстройки.

На рис. 98 показана номограмма, позволяющая определять ослабление сигнала, частота которого отличается от резонансной частоты контура. С помощью этой номограммы можно определять напряжения на элементах последовательного контура и напряжение на параллельном контуре при заданной расстройке. Для этого при заданной расстройке Δ и величине $Q$ определяется отношение $U/U_{рез}$, как показано на номограмме. Из этого отношения определяется величина $U$. Напряжение на конденсаторе или катушке индуктивности последовательного контура будет равно $UQ$. Аналогично определя-

ется величина напряжения на параллельном контуре. Следует отметить, что приведенная методика справедлива для малых расстроек.

На рис. 99 показан график, дающий форму верхней части резонансной кривой последовательного контура в зависимости от расстройки в отношениях токов или напряжений, выраженной в процентах, а на рис. 100 — в децибелах. Найденные из графиков величины справедливы для малых расстроек любого знака. По этим графикам можно определить напряжение на параллельном контуре при извест-

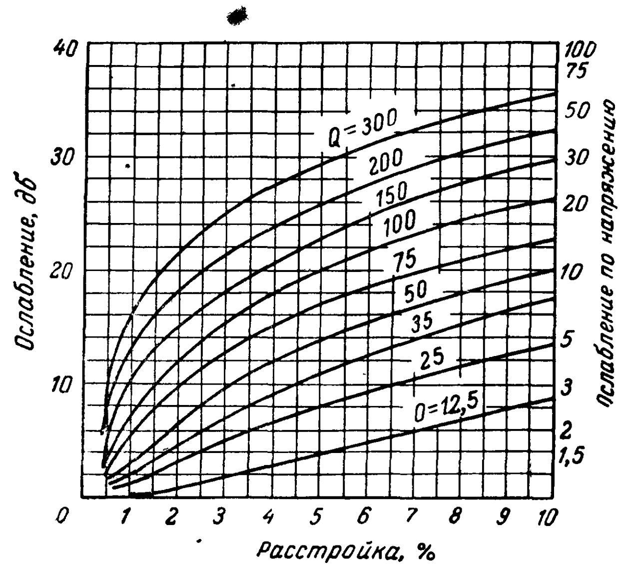



Рис. 100. Ослабление сигнала по резонансной кривой последовательного колебательного контура.

ных значениях $Q$, $\Delta$ и $U_{рез}$. Например, определим величину напряжения на контуре с добротностью $Q=50$ при расстройке в пределах $\pm 3\%$. По графику на рис. 99 находим, что напряжение на контуре будет составлять 32% от $U_{рез}$. По формуле

$$U = \frac{U_{рез} \cdot 32}{100}$$

определим значение $U$ при заданной расстройке.

Избирательностью контура называют величину, показывающую, во сколько раз помеха, отстоящая по частоте от резонанса на заданную расстройку, усиливается слабее сигнала, совпадающего по частоте с резонансной. Избирательность может быть определена по формуле

$$S = \frac{U_{рез}}{U} \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{50}\Delta\%\right)^2}.$$

При больших расстройках избирательность приближенно равна:

$$S = Q\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right).$$

На рис. 101 показана обобщенная резонансная кривая последовательного контура, построенная для небольших расстроек. По этой кривой можно вычислить добротность по заданным значениям избирательности, рабочей частоты и расстройки.

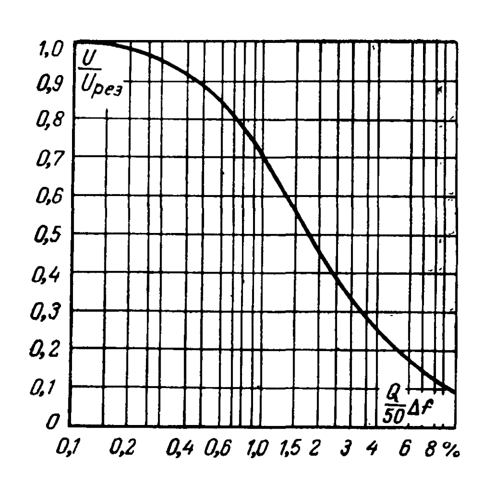



Рис. 101. Обобщенная резонансная кривая одиночного последовательного контура.

## Связанные контуры

Если два или более колебательных контура имеют электрическую или магнитную связь, то такие контуры называются связанными. Общий элемент, через который контуры связаны друг с другом, называется элементом связи.

Величина связи характеризуется коэффициентом связи $k_{св}$, который может иметь значения от 0 до 1

$$k_{св} = \frac{X_{св}}{\sqrt{X_1 \cdot X_2}}; \quad 0 \leqslant k_{св} \leqslant 1,$$

где $X_{св}$ — общее для обеих цепей реактивное сопротивление элемента связи;

$X_1$ и $X_2$ — сопротивления контуров, одноименные с сопротивлением элемента связи.

Изменение режима работы одного контура из-за влияния другого оценивается с помощью вносимых сопротивлений. Влияние второго

контура на первый сводится к внесению в первый контур сопротивлений — активного

$$R_{вн} = \frac{X_{св}^2}{Z_2^2} R_2$$

и реактивного

$$X_{вн} = -\frac{X_{св}^2}{Z_2^2} X_2,$$

где $Z_2$ — полное сопротивление второго контура.

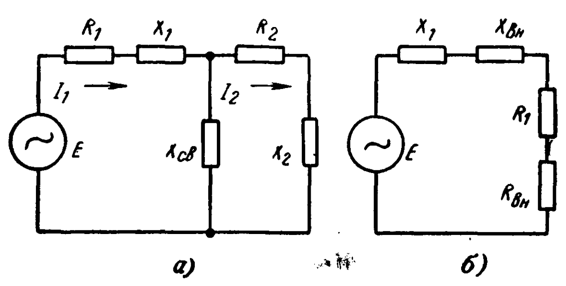



Рис. 102. Связанные контуры (*а*) и их эквивалентная схема (*б*).

На рис. 102 показана эквивалентная схема первого контура с учетом влияния на него второго контура. Резонанс в этой системе наступает при

$$X_1 - \frac{X_{св}^2}{Z_2^2} X_2 = 0,$$

считая, что $Z_2 \approx X_2$,

$$X_1 X_2 - X_{св}^2 = 0.$$

На практике используется несколько различных видов связи. На рис. 103 показана схема индуктивной связи между контурами. Контур $L_1C_1$, получающий энергию от внешнего источника э. д. с, назы-

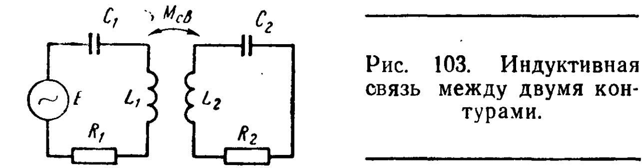



Рис. 103. Индуктивная связь между двумя контурами.

вается первичным контуром. Контур $L_2C_2$, получающий энергию от первичного контура, называется вторичным. При индуктивной связи ток первичного контура, проходя через катушку $L_1$, создает вокруг нее магнитное поле, силовые линии которого пересекают витки ка-

тушки $L_2$ и возбуждают в ней э. д. с. Эта э. д. с. создает во вторичном контуре ток, величина которого зависит от сопротивления связи $X_{св}$ и коэффициента связи $k_{св}$, которые равны:

$$X_{св} = \omega M_{св}; \quad k_{св} = \frac{M_{св}}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где $M_{св}$ — коэффициент взаимной индуктивности.

Для получения максимального тока и напряжения в контурах их настраивают в резонанс. В первичном контуре может быть либо резонанс напряжений, либо резонанс токов в зависимости от способа

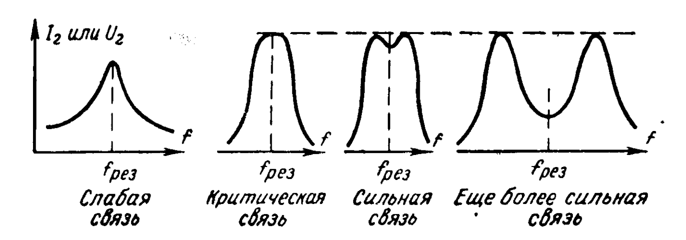



Рис. 104. Кривые резонанса двух связанных контуров при различной величине связи.

включения внешнего источника в этот контур. При небольших коэффициентах связи эквивалентный контур, состоящий из двух контуров, имеет одну резонансную частоту. Резонансная кривая имеет один максимум до так называемой критической связи. При дальнейшем увеличении связи обнаруживаются две резонансные частоты

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1 - k_{св}}}; \quad f_2 = \frac{f_0}{\sqrt{1 + k_{св}}},$$

которые отличаются друг от друга тем больше, чем сильнее связь между контурами (рис. 104). Эти частоты называются частотами связи. Зависимость частот связи от коэффициента связи показана на рис. 105. Связанные контуры позволяют регулировать полосу пропускания изменением степени связи между ними. До критической связи полоса пропускания двух одинаковых индуктивно связанных контуров равна полосе пропускания каждого контура. При дальнейшем увеличении связи полоса пропускания расширяется, но равномерность пропускания частот ухудшается, так как на резонансной кривой появится впадина. Коэффициент $\beta$, определяющий глубину провала, определяется по формуле

$$\beta = \frac{X_{св}}{R} = Qk_{св}.$$

Связь между контурами считается критической при $\beta = 1$.

На рис. 106 показаны обобщенные кривые для двух связанных контуров, где на вертикальной оси отложена величина ослабления

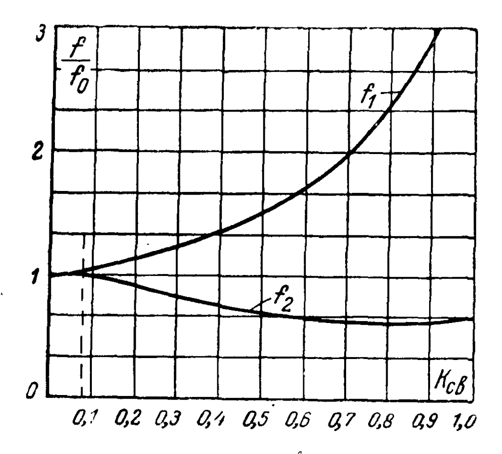



Рис. 105. График зависимости частот связи от коэффициента связи.

Рис. 106. Обобщенные кривые для двух связанных контуров.

сигнала, отличного от резонансной частоты $\sigma$, а на горизонтальной оси даны значения обобщенной расстройки

$$\alpha = 2Q \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{Q}{50} \Delta\%.$$

Выбрав кривую, соответствующую $\beta=1$, следует отыскать на ней точку, лежащую на уровне $\sigma_1$ и прочитать соответствующее ей значение $\alpha_1$. При этом расчетное значение добротности контура составит:

$$Q_р = \frac{\alpha_1 f_0}{2F_в},$$

где $F_в$ — верхняя граничная частота полосы пропускания.

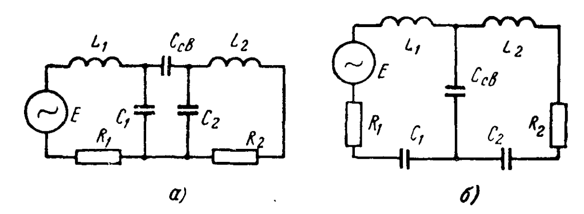



Рис. 107. Схема емкостной связи.
*а* — внешняя емкостная связь; *б* — внутренняя емкостная связь.

Полученное значение $Q_р$ следует сопоставить с конструктивно осуществимой добротностью контура $Q_к$. В табл. 31 приведены ориентировочные значения добротности контуров с катушками различных типов.

Таблица 31

**Ориентировочные значения добротности контуров**

| Резонансная частота $f_0$ | Добротность $Q_к$ | | Наилучший материал для сердечника |
|---|---|---|---|
| | без ферромагнитного сердечника | с ферромагнитным сердечником | |
| 0,1—1 *кгц* | — | 4—20 | Пермаллой |
| 1—10 *кгц* | — | 10—50 | Феррит |
| 10—100 *кгц* | — | 30—150 | » |
| 0,1—1 *Мгц* | 20—100 | 100—300 | » |
| 1—10 *Мгц* | 50—150 | 100—250 | Карбонильное железо |
| 10—100 *Мгц* | 100—250 | — | — |

Если $Q_р < Q_к$, то в дальнейшем следует считать $Q = Q_р$. При $Q_р > Q_к$ следует считать добротность контуров равной $Q_к$ и выбрать другую кривую $\beta$.

На рис. 107,*а* изображена схема емкостной связи между двумя контурами, в которой конденсатор связи $C_{св}$ не входит в состав первичного и вторичного контуров. Такая связь называется внешней емкостной связью. В этой схеме напряжение первичного контура действует через конденсатор связи $C_{св}$ на вторичный контур и создает

в нем ток. Коэффициент связи определяется по формуле

$$k_{св} = \frac{C_{св}}{\sqrt{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}.$$

Необходимо указать, что связь между контурами необходимо устанавливать достаточно точно, так как форма резонансной кривой системы связанных контуров очень чувствительна к изменению величины связи. В этом отношении внешняя емкостная связь имеет

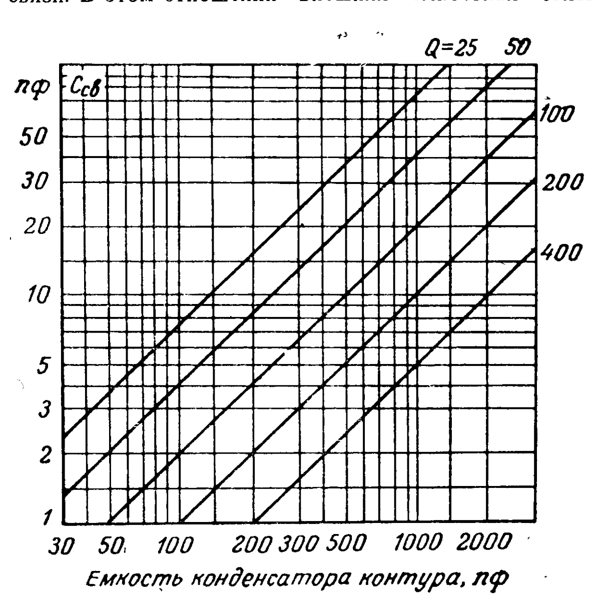



Рис. 108. График для расчета величины емкости конденсатора связи $C_{св}$.

преимущество перед другими типами связи, особенно при использовании малогабаритных катушек индуктивности.

В любительских схемах величина емкости контура находится в пределах от 30 до 3 000 *пф*, а добротность контура — в пределах от 10 до 300. На рис. 108 показан график для расчета величины емкости конденсатора связи $C_{св}$ при различных значениях добротности $Q$ и емкости контура $C$. Полученная величина $C_{св}$ обеспечивает связь между контурами, равную или несколько больше критической.

В схеме с внутренней емкостной связью (рис. 107,*б*) напряжение, которое получается на конденсаторе связи $C_{св}$ при прохождении через него тока, действует на вторичный контур и создает в нем ток. В схеме с внутренней емкостной связью чем больше емкость $C_{св}$, тем слабее связь. Для осуществления слабой связи в этой схеме величина $C_{св}$ берется порядка тысяч пикофарад.

Сопротивление связи и коэффициент связи определяются по формулам

$$X_{св} = -\frac{1}{\omega C_{св}}; \quad k_{св} = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}.$$

# ЛИТЕРАТУРА


1. Гинкин Г. Г., Справочник по радиотехнике, Госэнергоиздат, 1948.
2. Терещук Р. М. и др., Справочник радиолюбителя, Изд-во технической литературы УССР, Киев, 1961.
3. Волгов В. А., Детали контуров радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1954.
4. Азарх С. Х., Конденсаторы переменной емкости, изд-во «Энергия», 1965.
5. Ренне В. Т., Багалей Ю. В и Фридберг И. Д., Расчет и конструирование конденсаторов, изд-во «Техника», Киев, 1966.
6. Цейтлин Л. А., Индуктивности проводов и контуров, Госэнергоиздат, 1950.
7. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А., Расчет индуктивности, Госэнергоиздат, 1955.
8. Майоров А. С., Альбом частотных характеристик добротности катушек индуктивности на броневых сердечниках, Госэнергоиздат, 1958.
9. Матвеев Г. А. и Хомич В. И., Катушки с ферритовыми сердечниками, изд-во «Энергия», 1967.
10. Шольц Н. Н. и Пискарев К. А., Ферриты для радиочастот, изд-во «Энергия», 1966.
11. Волгов В. А., Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Энергия», 1967.
12. Жеребцов И. П., Радиотехника, изд-во «Связь», 1965.
13. Асеев Б. П., Колебательные цепи, Изд-во по вопросам связи и радио, 1955.
14. Хайкин С. Э., Электромагнитные колебания и волны, изд-во «Энергия», 1964.
15. Цыкин Г. С., Трансформаторы низкой частоты, Изд-во по вопросам связи и радио, 1955.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

6Ф2
С45
УДК 621.372.061



**Скрипников Ю. Ф.**

С 45 Колебательный контур. М., «Энергия», 1970.

128 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 739)

В брошюре приведены основы расчета параметров колебательных контуров и их элементов — конденсаторов и катушек индуктивности. Рассмотрены некоторые физические процессы, протекающие в контурах, конденсаторах и катушках индуктивности. Приведены справочные данные, необходимые для расчетов.

Брошюра рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

3-4-5 / 311-70 6Ф2

**Скрипников Юрий Федорович**

*Колебательный контур*

Редактор *Б. А. Снедков*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Техн. редактор *М. П. Осипова*

Корректор *Е. Х. Горбунова*

Сдано в набор 23/XII 1969 г. Подписано к печати 19/V 1970 г. Т-06364
Формат 84×108$^1/_{32}$ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 6,72 Уч.-изд. л. 7,07
Тираж 60 000 экз. Цена 31 коп. Зак. 2585

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Колебательные контуры находят широкое применение в промышленной и радиолюбительской аппаратуре. Колебательные контуры являются одной из важнейших составных частей радиоприемников, передатчиков, телевизоров. Поэтому предварительный расчет колебательных контуров и их элементов облегчает настройку устройств, в которых они применяются.

Конденсаторы, входящие в состав колебательных контуров, как правило, применяются промышленного изготовления и лишь в отдельных случаях изготовляются радиолюбителями самостоятельно. К таким конденсаторам относятся, в частности, конденсаторы переменной емкости. В настоящей брошюре приводятся расчеты конденсаторов переменной емкости, нашедших наиболее широкое применение. Наряду с расчетами приводятся параметры серийных конденсаторов, которые используются в колебательных контурах.

Катушки индуктивности, входящие в состав колебательных контуров, радиолюбителям приходится изготовлять в большинстве случаев самостоятельно. Поэтому в настоящей брошюре вопросу расчета катушек индуктивности уделено особое место. От качества катушек индуктивности в основном зависят свойства колебательных контуров, поэтому успешное конструирование катушек возможно при условии правильного выбора их параметров.

Отечественная литература по вопросам расчета параметров конденсаторов, катушек индуктивности и колебательных контуров достаточно обширна. Однако необходимый материал размещен во многих книгах и журналах, что создает определенные трудности при работе с ним. К тому же большой спрос на эту литературу делает ее библиографической редкостью. В настоящей работе автор сделал попытку систематизировать материал по этим вопросам. При подборе материала автор стремился более подробно осветить вопросы, имеющие наибольшее практическое значение и интересующие большинство радиолюбителей.

В брошюре приведены расчетные формулы, таблицы, графики и номограммы и лишь в отдельных случаях описания физических процессов, облегчающие пользование расчетным материалом. В брошюре не рассматриваются вопросы, связанные с практической стороной конструирования конденсаторов и катушек индуктивности, так как имеется в виду, что радиолюбитель знаком с этими вопросами.

Не следует считать брошюру полным рецептурным справочником по расчету колебательных контуров и их элементов. Приведенный в ней материал охватывает лишь наиболее распространенные случаи, с которыми может столкнуться радиолюбитель в своей работе.

*Автор*

# ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| | |
|---|---|
| Ток | $i$, $I$ |
| Напряжение | $U$ |
| Электродвижущая сила | $E$ |
| Сопротивление активное | $R$ |
| Эквивалентное сопротивление параллельного контура | $R_э$ |
| Сопротивление характеристическое | $\rho$ |
| Сопротивление шунтирующее | $R_ш$ |
| Индуктивность | $L$ |
| Емкость | $C$ |
| Начальная магнитная проницаемость | $\mu_0$ |
| Динамическая магнитная проницаемость | $\mu_д$ |
| Относительная диэлектрическая проницаемость | $\varepsilon$ |
| Частота колебаний | $f$ |
| Резонансная частота контура | $f_0$ |
| Угловая частота | $\omega$ |
| Добротность | $Q$ |
| Полоса пропускания контура | $П_{пр}$ |

*Глава первая*

# ЕМКОСТЬ И КОНДЕНСАТОРЫ

## Определяющие параметры конденсатора

Основной единицей емкости считается фарада, т. е. емкость, заряд которой равен 1 *к* при напряжении между обкладками конденсатора в 1 *в*

$$C = \frac{Q}{U},$$

где $C$ — емкость, *ф*;

$Q$ — количество электричества, *к*;

$U$ — напряжение, *в*.

На практике применяются более мелкие единицы емкости:

$10^{-6}$ *ф*=1 микрофарада (1 *мкф*);

$10^{-9}$ *ф*=1 нанофарада (1 *нф*);

$10^{-12}$ *ф*=1 пикофарада (1 *пф*).

Конденсатор состоит из двух или нескольких пластин-проводников, именуемых обкладками, разделенными друг от друга изоляционным материалом — диэлектриком. Емкость конденсатора определяется тремя величинами:

1) площадью обкладок конденсатора;
2) расстоянием между обкладками;
3) диэлектрической проницаемостью материала между обкладками.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ — величина, показывающая, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора при заполнении пространства между пластинами конденсатора тем или иным материалом. Значения диэлектрической проницаемости некоторых материалов приведены в табл. 1.

Конденсатор из двух параллельных плоскостей — один из самых распространенных типов конденсаторов, так как прибор для получения заданной емкости при наименьшем объеме практически получается при параллельных пластинах, разделенных твердым диэлектриком или при жесткой конструкции пластин небольшим воздушным промежутком. Емкость двухпластинчатого плоскопараллельного конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{0{,}886 \varepsilon S}{a},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *пф*;

$S$ — площадь пластин, *см*$^2$;

Таблица 1

**Диэлектрическая проницаемость материалов**

| Материал | ε | Материал | ε |
|---|---|---|---|
| Аминопласты | 5,0—9,0 | Сегнетокерамика | 450—1 700 |
| Бакелит | 4,0—4,6 | Слюда мусковит | 6,8—7,2 |
| Береза сухая | 3,0—4,0 | Слюда флогопит | 8,0 |
| Бумага кабельная | 4,0—4,8 | Смолы эпоксидные | 3,7—3,9 |
| Бумага конденсаторная | 3,5 | Совенит | 3,0—4,0 |
| Винипласт | 3,5—3,6 | Сосна сухая | 3,5 |
| Волокнит | 7,5 | Стеатит | 6,0—6,5 |
| Воск пчелиный | 2,8—2,9 | Стекло | 4,0—10 |
| Галовакс | 4,5—5,5 | Стеклотекстолит | 7,5—8,0 |
| Гетинакс А, Б, В, Г | 6,0—8,0 | Стекловолокнит | 8,0 |
| Дельта-древесина | 8,0 | Текстолит | 7,5—8,0 |
| Дуб сухой | 3,5 | Текстолит ВЧ | 7,5—8,0 |
| Канифоль | 3,5 | Тиконд | 70—150 |
| Капрон, нейлон | 3,8—4,2 | Термоконд | 16—25 |
| Каучук | 2,4 | Ультрафарфор | 6,0 |
| Кварц плавленый | 4,1—4,4 | Фторопласт | 2,5—2,7 |
| Лакоткань хлопчатобумажная | 4,0—4,6 | Фторопласт-4 | 1,9—2,2 |
| Лакоткань шелковая | 3,8—4,5 | Фибра | 3,5 |
| Микалекс | 8,0—10 | Фенопласт | 8,0 |
| Миканит | 6,0 | Фенопласт К-21-22 | 7,5—9,5 |
| Мрамор | 8,0—10 | Целлулоид | 5,5 |
| Неолейкорит | 6,5—7,5 | Целофан | 3,5—4,0 |
| Озокерит | 2,3 | Церезин | 2,1—2,3 |
| Органическое стекло | 3,5—3,6 | Шелк натуральный | 4,0—5,0 |
| Парафин | 2,1—2,2 | Щеллак | 3,5 |
| Полистирол | 2,4—2,6 | Эбонит | 2,7—3,0 |
| Полихлорвинил | 3,5—5,0 | Этилцеллюлоза | 3,5 |
| Полиэтилен | 2,2—2,3 | Эмаль стекловидная | 4,0—7,0 |
| Полипропилен | 2,0—2,1 | Электрокартон | 3,5 |
| Прессшпан | 3,0—4,0 | Янтарь | 2,8 |
| Резина | 3,0 | | |

*a* — расстояние между пластинами, *мм*;

ε — диэлектрическая проницаемость материала между обкладками.

На рис. 1 приведен график для определения емкости конденсатора по площади перекрытия и расстоянию между пластинами. Диэлектриком служит воздух, у которого величина ε равна единице. По этому графику удобно определять емкость конденсаторов, предназначенных для работы на УКВ. На рис. 2 приведена номограмма, позволяющая определять емкость плоскопараллельного конденсатора в широких пределах. Эти расчеты будут верными при том предположении, что электрические заряды распределены по всей площади пластин равномерно. Фактически по краям пластин распола-

раются дополнительные заряды, увеличивающие расчетную емкость. При ширине пластин конденсатора, более чем в десять превышающей расстояние между пластинами, влиянием этого эффекта можно пренебречь.

Для конденсатора с числом пластин $n$ емкость равна:

$$C = \frac{0,886\,(n-1)\,\varepsilon S}{a}.$$

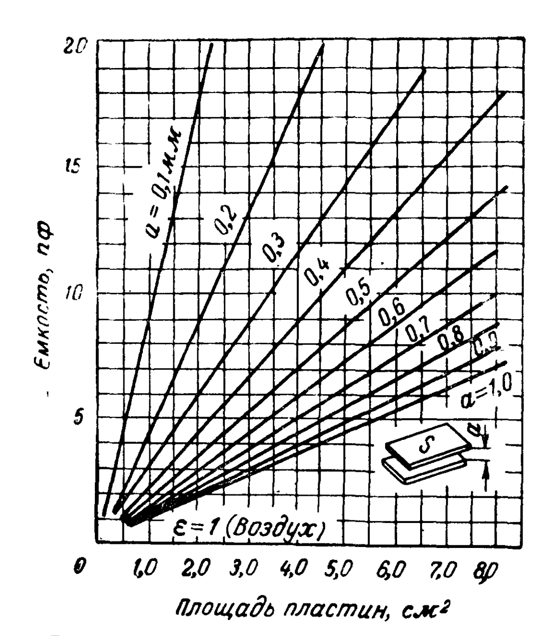



Рис. 1. График зависимости емкости конденсатора от площади перекрытия и расстояния между пластинами.

Для конденсатора с многослойным диэлектриком емкость определяется из выражения

$$C = \frac{0,886S}{\frac{a_1}{\varepsilon_1}+\frac{a_2}{\varepsilon_2}+\ldots+\frac{a_n}{\varepsilon_n}}.$$

Емкость отрезка коаксиального кабеля

$$C = \frac{0,24\varepsilon l}{\lg\frac{D}{d}},$$

где $C$ — емкость, *пф*;

$l$ — длина отрезка, *см*;

$D$ — внутренний диаметр наружного проводника, *см*;

$d$ — внешний диаметр внутреннего проводника, *см*.

Емкость отрезка двухпроводной линии

$$C = \frac{0,12\varepsilon l}{\lg \frac{2a}{D}},$$

где $C$ — емкость отрезка линии, *пф*;

$l$ — длина отрезка, *см*;

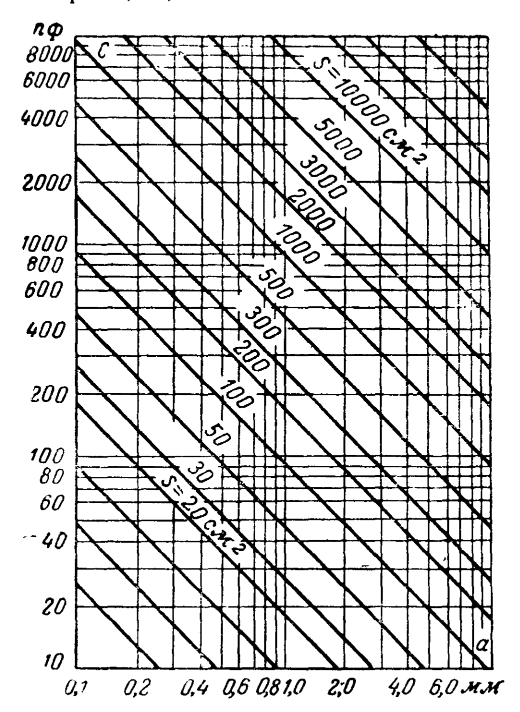



Рис. 2. Номограмма для расчета емкости плоскопараллельного конденсатора.

$a$ — расстояние между проводниками, *см*;

$D$ — диаметр проводников, *см*.

Емкость двух параллельных проводников радиусами $R$ и $r$ при условии $a \gg R > r$

$$C = \frac{0,556\varepsilon l}{\lg \frac{a^2}{rR}},$$

где $C$ — емкость, *пф*;

$l$ — длина проводников, *см*;

$a$ — расстояние между проводниками, *см*;
$R$ и $r$ — радиусы проводников, *см*.

Емкость прямого провода, параллельного земле, при условии $l>h>D$

$$C=\frac{0{,}24\varepsilon l}{\lg\frac{4h}{D}},$$

где $C$ — емкость провода, *пф*;
$l$ — длина провода, *см*;
$h$ — расстояние до земли, *см*;
$D$ — диаметр провода, *см*.

## Печатные конденсаторы

**Печатные конденсаторы** применяются в печатных схемах для различных блокировок и фильтрации частот порядка 70—100 *Мгц*, а также входят в состав контуров, выполненных печатным способом. Расчет емкости этих конденсаторов производится по формуле плоского конденсатора.

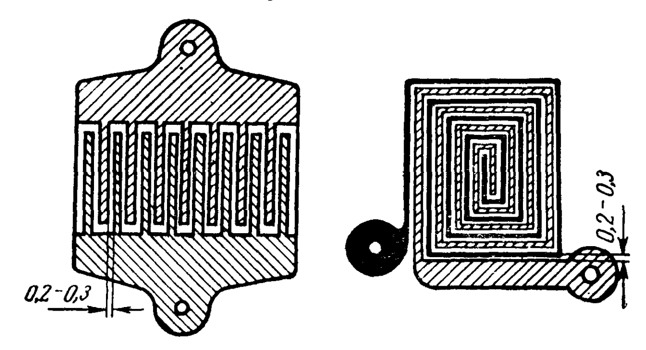



Рис. 3. Печатные конденсаторы одностороннего типа.

Обкладки печатных конденсаторов могут быть расположены как на обеих сторонах печатной платы, так и на одной стороне. Конденсаторы первого типа имеют большую емкость, величина которой определяется площадью обкладок, толщиной диэлектрика и его диэлектрической проницаемостью. Эта емкость обычно составляет 3—5 *пф/см²*, при использовании плат из феноловых пластмасс— 10—15 *пф/см²* и 0,02—0,03 *мкф/см²* при использовании керамики с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Для уменьшения индуктивности обкладкам придается прямоугольная форма с соотношением сторон 1 : 2.

Конденсаторы небольшой емкости выполняются с обкладками, расположенными на одной стороне платы. Для увеличения емкости им придается зигзагообразная или гребенчатая форма (рис. 3). При ширине промежутка между торцами порядка 0,2 *мм* и основания со средней величиной диэлектрической проницаемости (4—5) емкость между торцами будет порядка 1,5—1,8 *пф/см*.

## Конденсаторы переменной емкости

Конденсаторы переменной емкости чаще всего используются для плавной настройки колебательных контуров. Наибольшее распространение получили прямоемкостные и прямочастотные конденсаторы переменной емкости.

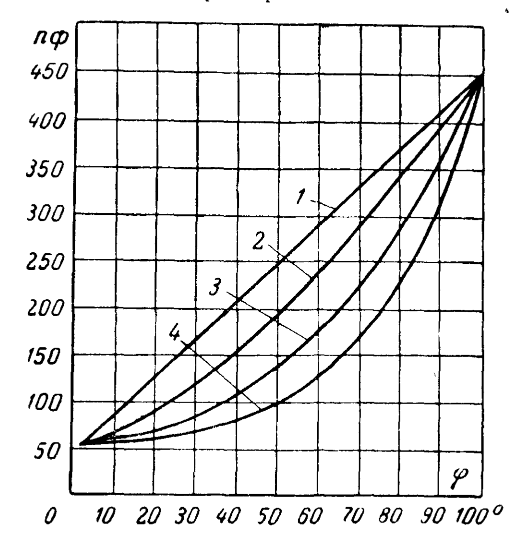



Рис. 4. Изменение емкости конденсаторов с различной формой пластин.

*1* — прямоемкостного; *2* — прямоволнового; *3* — логарифмического; *4* — прямочастотного.

На рис. 4 приведен сравнительный график изменения емкости конденсаторов с различной формой пластин, а на рис. 5 — форма пластин переменных конденсаторов, соответствующих графику. Как видно из графика для прямоемкостного конденсатора характерна

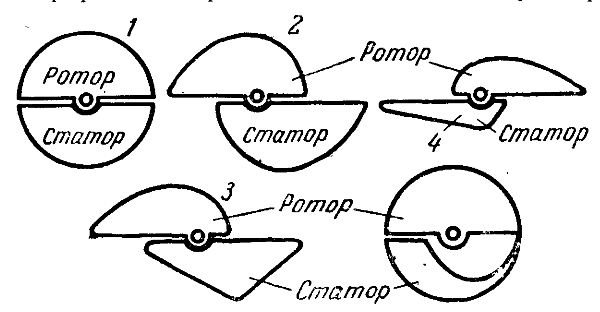



Рис. 5. Форма пластин конденсаторов переменной емкости.

линейная зависимость изменения емкости от угла поворота ротора. В случае применения прямочастотного конденсатора обеспечивается линейная зависимость между изменением частоты контура и углом поворота ротора.

Другой разновидностью конденсаторов переменной емкости является конденсатор с логарифмической формой пластин или среднелинейной. Основная особенность этого конденсатора заключается в том, что процентное изменение емкости, приходящееся на одно деление шкалы, остается одинаковым в любом месте шкалы. Это свойство облегчает спаривание конденсаторов на одной оси.

При расчете конденсаторов переменной емкости, работающих при высоких напряжениях, следует учитывать диэлектрическую прочность диэлектрика. Так как в большинстве случаев диэлектриком служит воздух, следует помнить, что при нормальном давлении и влажности критическое значение пробоя воздуха приблизительно равно 1 000 *в* на 1 *мм*. Принимая во внимание необходимость запаса по диэлектрической прочности, для конденсаторов переменной емкости следует принимать 1 *мм* зазора на каждые 500—700 *в* амплитуды напряжения.

Следует отметить, что пробивное напряжение конденсатора с воздушным диэлектриком зависит от толщины пластин и их обработки. При напряжении до 500 *в* толщина пластин $t$ берется от 0,5 до 3 *мм* и рассчитывается по формуле

$$t = 0{,}3a,$$

где $a$ — расстояние между пластинами, *мм*.

При небольших зазорах (около 0,5—1,5 *мм*) толщина пластин определяется необходимостью обеспечить жесткость конструкции и берется порядка 0,7—0,9 *мм*.

При расчете конденсаторов переменной емкости необходимо предварительно найти минимальную $C_{мин}$ и максимальную $C_{макс}$ емкости. Максимальная емкость конденсатора определяется областью применения, а минимальная — его конструктивными данными: размерами, взаимным расположением ротора и статора, системой крепления статора и т. п.

Употребительные в практике значения максимальных и минимальных величин емкости применительно к приемо-передающим устройствам приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Емкость конденсаторов переменной емкости**

| Диапазон | ДВ | СВ | ПВ | КВ | УКВ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_{макс}$, *пф* | 450—750 | 250—450 | 150—250 | 50—150 | 40—50 | 20—35 | 15—20 |
| $C_{мин}$, *пф* | 15—25 | 10—15 | 8—12 | 6—10 | 5—7 | 3,5 | 3,5 |

Широкое применение находят конденсаторы переменной емкости, состоящие из нескольких конденсаторных секций, расположенных на одной оси. Наиболее употребительные блоки состоят из двух-

трех секций. При большом числе секций уменьшается механическая жесткость блока, увеличиваются его размеры и снижается стабильность из-за возможности прогиба длинной оси.

## Прямоемкостные конденсаторы

Прямоемкостные конденсаторы выполняются с полукруглой или секторообразной формой роторных пластин (рис. 6 и 7). У конденсатора с полукруглыми пластинами изменение емкости от минимального значения до максимального происходит при повороте ротора от 0 до 180°, а у конденсатора с секторообразными пластинами — от 0 до 90°. Преимуществом конденсатора второго типа является возможность последовательного соединения его статорных пластин (рис. 7,*б*), при этом повышается его рабочее напряжение.

Рабочей площадью пластин конденсатора первого типа при условии полного введения пластин ротора явится:

$$S=1{,}57(R^2-r^2),$$

где $R$ — радиус пластины;

$r$ — радиус внутреннего выреза в статоре.

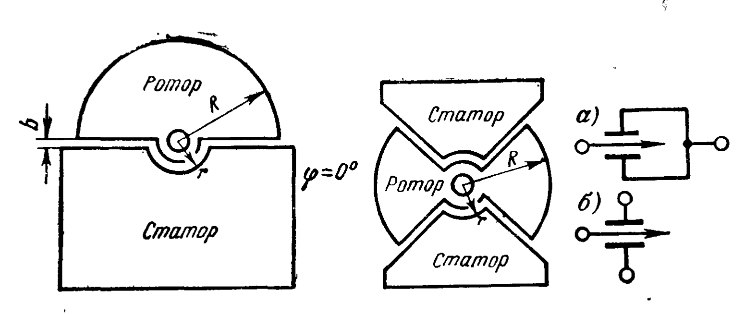



Рис. 6. Прямоемкостный конденсатор с полукруглой формой роторных пластин.

Рис. 7. Прямоемкостный конденсатор с секторообразной формой роторных пластин.

*а* — параллельное соединение статорных пластин; *б* — последовательное соединение статорных пластин.

Максимальная емкость переменной части конденсатора с полукруглыми пластинами

$$C_{\text{макс}}=\frac{0{,}139\,(n-1)\,(R^2-r^2)\,\varepsilon}{a},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *пф*;

$n$ — общее число пластин статора и ротора;

$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

Максимальная емкость переменной части каждого плеча конденсатора с секторообразными пластинами

$$C_{макс} = \frac{0,139(n-1)(R^2-r^2)\varepsilon}{2a}$$

Общее число пластин $n$ конденсатора

$$n = 1 + \frac{7,2C_{макс}a}{R^2-r^2}.$$

Емкость при заданном угле поворота ротора

$$C_{\varphi} = (C_{макс} - C_{мин})\frac{\varphi}{\pi} + C_{мин},$$

где $\varphi$ — угол поворота ротора, *рад*.

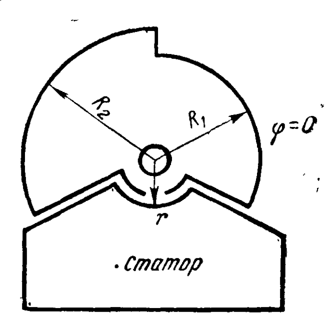



Рис. 8. Форма роторных пластин прямоемкостного конденсатора с углом поворота 240°.

На рис. 8 представлена форма пластины ротора прямоемкостного конденсатора с максимальным углом поворота 240°.

Максимальная емкость этого конденсатора определяется по формуле

$$C_{макс} = \frac{0,093(R_2^2-r^2)(n-1)}{a},$$

где $R_2$ — больший радиус ротора, *см*;

$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*.

Число пластин $n$ по заданным значениям $C_{макс}$ и $a$

$$n = 1 + 10,8 \cdot \frac{C_{макс}a}{R_2^2-r^2},$$

где $a$ — расстояние между пластинами, *см*.

Меньший радиус пластин ротора $R_1$ определяется из выражения

$$R_1 = \frac{\sqrt{R_2^2+r^2}}{2}.$$

### Прямоволновый конденсатор

П р я м о в о л н о в ы й к о н д е н с а т о р при настройке контура дает равномерное изменение длины волны, приходящееся на каждое деление шкалы. Для получения прямолинейной зависимости

Между длиной волны и углом поворота ротора необходимо выполнить условие

$$C_A = (aA + b)^2,$$

где $C_A$ — емкость конденсатора при $A$ делениях шкалы, *пф*;
$a$ и $b$ — коэффициенты, зависящие от максимальной и минимальной емкостей конденсатора.

Коэффициенты $a$ и $b$ равны:

$$a \approx \frac{\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{мин}}}}{100}; \quad b = \sqrt{C_{\text{мин}}}.$$

Максимальная емкость прямоволного конденсатора

$$C_{\text{макс}} = \frac{0,0695\,(n-1)\,(R^2 - r^2)\,\varepsilon}{a}.$$

Емкость при заданном угле поворота ротора

$$C_\varphi = \left(2\sqrt{C_{\text{макс}}C_{\text{мин}}} - C_{\text{мин}}\right)\frac{\varphi}{\pi} + \left(\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{мин}}}\right)^2\left(\frac{\varphi}{\pi}\right)^2 + C_{\text{мин}}.$$

Кривая внешнего радиуса пластин, *см*

$$R = \sqrt{\left(R^2_{\text{макс}} - r^2\right)\frac{\varphi}{\pi} + r^2}.$$

### Прямочастотный конденсатор

Пластины ротора прямочастотного конденсатора имеют форму, изображенную на рис. 9. Текущий радиус пластин ротора рассчитывается по формуле

$$r_{\text{т}} = R_{\text{макс}}\sqrt{\frac{1 - \dfrac{r^2}{R^2_{\text{макс}}}}{\left[1 + (k_f - 1)\dfrac{\varphi}{\pi}\right]^2} + \frac{r^2}{R^2_{\text{макс}}}},$$

где $R_{\text{макс}}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;
$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;
$\varphi$ — угол поворота ротора, для которого рассчитывается значение радиуса $r_{\text{т}}$;
$k$ — коэффициент перекрытия, равный $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$.

Число пластин $n$ конденсатора

$$n = 1 + 14,4\,C_{\text{макс}}\frac{(k_f - 1)\,ak_f^2}{\left(R^2_{\text{макс}} - r^2\right)\left(k_f^2 - 1\right)},$$

где $C_{\text{макс}}$ — максимальная емкость переменной части конденсатора, *пф*;

$R_{макс}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;
$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;
$k_f$ — коэффициент перекрытия;
$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

## Логарифмический конденсатор

Максимальная емкость логарифмического конденсатора

$$C_{макс} = \frac{0{,}0695\,(n-1)\,(R^2_{макс} - r^2)\left(1 - \frac{C_{мин}}{C_{макс}}\right)\varepsilon}{a \ln \frac{C_{макс}}{C_{мин}}},$$

где $C_{макс}$ — максимальная емкость переменной части конденсатора *пф*;

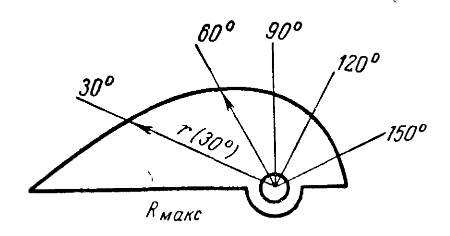



Рис. 9. Форма роторных пластин прямочастотного конденсатора.

$R_{макс}$ — максимальный радиус пластины ротора, *см*;
$r$ — радиус выреза в пластинах статора, *см*;
$a$ — расстояние между пластинами, *см*.

Текущий радиус пластин ротора

$$r_т = \sqrt{(R^2_{макс} - r^2)\left(\frac{C_{макс}}{C_{мин}}\right)^{\frac{\varphi - \pi}{\pi}} + r}.$$

При расчете конденсаторов переменной емкости общее число пластин $n$ следует выбирать исходя из следующих соображений: при большом числе пластин длина конденсатора получается чрезмерной, при малом — возрастает размер пластин, что понижает их жесткость и увеличивает габариты конденсатора. Число пластин следует выбирать так, чтобы длина конденсаторной секции примерно была равна среднему радиусу ротора. Ориентировочное число пластин конденсатора можно выбрать по табл. 3.

Таблица 3

**Число пластин конденсаторов переменной емкости**

| $C_{макс}$, *пф* | До 750 | 350—500 | 200—300 | 100—150 | 50—60 | 40—50 | 25—35 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | До 33 | 15—25 | 9—11 | 7—13 | 7—13 | 5—11 | 3—7 |

## Конденсаторы переменной емкости с твердым диэлектриком

Уменьшение размеров конденсаторов переменной емкости достигается при использовании в качестве диэлектрика материалов с большей, чем у воздуха диэлектрической проницаемостью, причем толщина диэлектрика может быть значительно меньше воздушного зазора, а также значительно тоньше могут быть и пластины. В конденсаторах подобного типа диэлектрик получается многослойным, состоящим из чередующихся слоев твердого диэлектрика и воздуха. Емкость конденсатора с таким диэлектриком равна:

$$C = \frac{A}{\frac{a_1}{\varepsilon_1} + \frac{a_2}{\varepsilon_2}},$$

где

$$A = \frac{S(n-1)}{3,6\pi};$$

$a_1$ и $a_2$ — толщины твердого диэлектрика и воздушной прослойки, *см*; $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$ — их диэлектрические проницаемости.

При расчетах удобней пользоваться понятием эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$ многослойного диэлектрика, при которой конденсатор обладает такой же емкостью, как и при многослойном диэлектрике. Толщина эквивалентного диэлектрика равна:

$$a = a_1 + a_2.$$

Следовательно,

$$C = A\frac{\varepsilon_э}{a}.$$

В конденсаторах подобного типа в качестве второго диэлектрика применяется воздух, у которого $\varepsilon_2 = 1$, тогда $\varepsilon_э$ равна:

$$\varepsilon_э = \varepsilon_1 \frac{1 + \frac{a_2}{a_1}}{1 + \frac{a_2}{a_1}\varepsilon_1}.$$

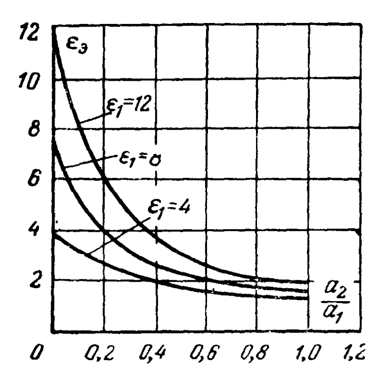



Рис. 10. График для определения эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$.

На рис. 10 представлена зависимость эквивалентной проницаемости $\varepsilon_э$ от отношения $a_2/a_1$ при различных значениях диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика.

Следует отметить, что величина потерь $\operatorname{tg}\delta$ в конденсаторах с твердым диэлектриком больше, чем при воздушном диэлектрике и определяется в основном потерями в твердом диэлектрике. На практике используются два способа расположения твердого диэлек-

трика: в виде прокладки между пластинами и в виде тонкой пленки, нанесенной на пластины. Материалом для прокладок служит пленка из полистирола, фторопласта-4, слюды и других материалов толщиной 0,05—0,2 *мм.*

Достоинством таких конденсаторов являются малые габариты при большой емкости, простота изготовления, а недостатком — низкие стабильность и точность. Такие конденсаторы применяются в неответственных устройствах, когда к точности и стабильности не предъявляется особых требований.

Конструктивной особенностью сдвоенных блоков из конденсаторов с твердым диэлектриком является расположение статорных и роторных секций под углом 180° друг к другу, что в свою очередь уменьшает связь между ними, не увеличивая габаритов блока. Такие конденсаторы делаются в основном прямоемкостными, и их расчет производится обычным методом, следует только в расчетные формулы ввести значения $\varepsilon_э$.

Соотношения между максимальной и минимальной емкостями характеризуются следующими данными:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $C_{макс}$, *пф* . . . . | 180 | 230 | 300 | 370 |
| $C_{мин}$, *пф* . . . . | 7 | 8 | 10 | 10 |

Общее число пластин при этих значениях емкости лежит в пределах от 16 до 30.

## Конденсатор в цепи переменного тока

При включении идеального конденсатора, т. е. конденсатора, не имеющего потерь, в цепь переменного тока с частотой $\omega$ и известной амплитудой переменного напряжения $U_{макс}$, амплитуда тока в цепи конденсатора будет определяться по закону Ома:

$$I_{макс} = \omega C U_{макс},$$

а для цепи, содержащей активное сопротивление $R$, присоединенное к источнику с напряжением $U_{макс}$, амплитуда тока будет равна:

$$I_{макс} = \frac{U_{макс}}{R}.$$

Сравнивая два последних выражения, можно заметить, что амплитуда тока в цепи конденсатора такова, как если бы вместо конденсатора было включено активное сопротивление

$$R = \frac{1}{\omega C}.$$

Следовательно, для переменного тока конденсатор представляет сопротивление, величина которого равна:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

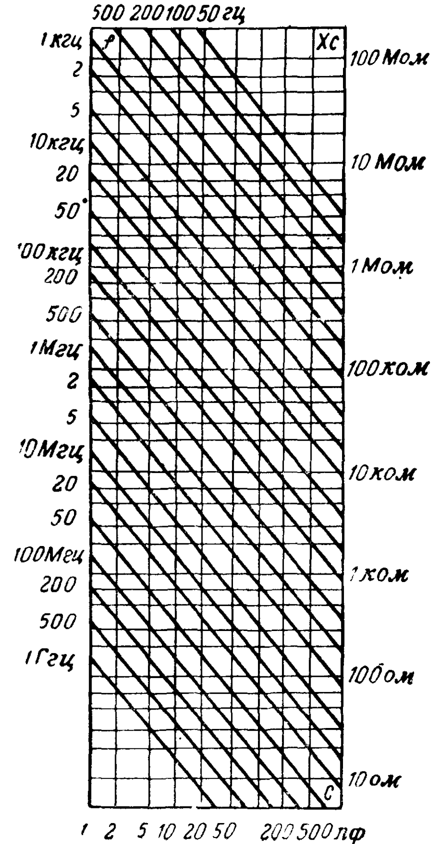



Рис. 11. Номограмма для расчета емкостного сопротивления конденсаторов.

Это сопротивление конденсатора называется реактивным сопротивлением и обозначается буквой $X$, а буква $C$ в индексе указывает, что это сопротивление емкостное.

Емкостное сопротивление имеет существенное отличие от активного, которое заключается главным образом в вопросе о потреблении мощности. В активном сопротивлении вся мощность, отдаваемая источником, превращается в тепло и расходуется на нагревание активного сопротивления. В случае емкостного сопротивления вся работа, совершаемая источником при заряде конденсатора, превращается в энергию электрического поля конденсатора. При разряде конденсатора вся энергия его электрического поля возвращается в источник. Можно считать, что вся энергия, накопленная в конденсаторе за четверть периода, пока он заряжался, полностью возвращается в источник за следующую четверть периода. Следовательно, конденсатор без потерь не потребляет энергии от источника.

Сопротивления, не расходующие полученную от источника энергию, а возвращающие ее источнику, называются реактивными сопротивлениями.

Для звуковых частот емкостное сопротивление можно определять по формуле

$$X_C = \frac{159\,000}{fC},$$

где $X_C$ — емкостное сопротивление, *ом*;
$f = \omega/2\pi$ — частота тока в цепи, *гц*;
$C$ — емкость конденсатора, *мкф*.

Емкостное сопротивление конденсатора в зависимости от длины волны определяется по формуле

$$X_C = \frac{530\lambda}{C},$$

где $X_C$ — емкостное сопротивление, *ом*;

$\lambda$ — длина волны, *м*;

$C$ — емкость конденсатора, *пф*.

При токе с частотой 50 *гц* формула для определения емкостного сопротивления конденсатора имеет вид:

$$X_C = \frac{3\,180}{C},$$

где $C$ — емкость конденсатора, *мкф*.

Для быстрого определения величины $X_C$ служит номограмма (рис. 11), на которой наглядно представлены величины емкостного сопротивления конденсаторов различной емкости на частотах от 50 *гц* до 1 *Ггц*. В табл. 4 и 5 приводятся значения емкостных сопротивлений для различных величин емкости как для низких, так и высоких частот.

Таблица 4

**Емкостное сопротивление конденсаторов на низких частотах, *ом***

| Емкость, *мкф* | Частота | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 *гц* | 250 *гц* | 500 *гц* | 1 000 *гц* | 2 500 *гц* | 5 000 *гц* | 10 000 *гц* |
| 0,1 | 32 000 | 6 400 | 3 200 | 1 600 | 640 | 320 | 160 |
| 0,5 | 6 400 | 1 280 | 640 | 320 | 128 | 64 | 32 |
| 1,0 | 3 200 | 640 | 320 | 160 | 64 | 32 | 16 |
| 2,0 | 1 600 | 320 | 160 | 80 | 32 | 16 | 8 |
| 3,0 | 1 060 | 212 | 106 | 53 | 21,2 | 10,6 | 5,3 |
| 4,0 | 800 | 160 | 80 | 40 | 16 | 8 | 4 |
| 5,0 | 640 | 128 | 64 | 32 | 12,8 | 6,4 | 3,2 |
| 10,0 | 320 | 64 | 32 | 16 | 6,4 | 3,2 | 1,6 |
| 50,0 | 64 | 12,8 | 6,4 | 3,2 | 1,28 | 0,64 | 0,32 |
| 100,0 | 32 | 6,4 | 3,2 | 1,6 | 0,64 | 0,32 | 0,16 |

Другое существенное отличие емкостного сопротивления от активного состоит в том, что в емкостном сопротивлении ток сдвинут по фазе относительно напряжения на 90°, в то время как в активном сопротивлении ток совпадает по фазе с напряжением.

Если к конденсатору приложено напряжение

$$u = U_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi),$$

то ток в цепи

$$i = I_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ),$$

следовательно, напряжение на четверть периода отстает от тока.

Реальный конденсатор всегда обладает электрическими тепловыми потерями. Потери в конденсаторах вызываются замедленной поляризацией и проводимостью диэлектрика. В схемах замещения

Таблица 5.

**Емкостное сопротивление конденсатора на высокой частоте, *ом***

| Емкость | Частота | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 *Мгц* | 10 *Мгц* | 5 *Мгц* | 3 *Мгц* | 1,5 *Мгц* | 600 *кгц* | 468 *кгц* | 200 *кгц* |
| 10 *пф* | 530 | 1 590 | 3 180 | 5 300 | 10 600 | 26 500 | 34 000 | 79 500 |
| 20 *пф* | 265 | 795 | 1 590 | 2 650 | 5 300 | 13 250 | 17 000 | 39 800 |
| 50 *пф* | 106 | 318 | 635 | 1 060 | 2 120 | 5 300 | 6 800 | 15 900 |
| 100 *пф* | 53,0 | 159,0 | 318,0 | 530 | 1 060 | 2 650 | 3 400 | 7 950 |
| 200 *пф* | 26,5 | 79,5 | 159,0 | 265 | 530 | 1 325 | 1 700 | 3 980 |
| 500 *пф* | 10,6 | 31,8 | 63,5 | 106 | 212 | 530 | 680 | 1 590 |
| 1 000 *пф* | 5,30 | 15,90 | 31,8 | 53,0 | 106,0 | 265 | 340 | 795 |
| 2 000 *пф* | 2,65 | 7,95 | 15,9 | 26,5 | 53,0 | 132 | 170 | 398 |
| 5 000 *пф* | 1,06 | 3,18 | 6,35 | 10,6 | 21,2 | 53 | 68 | 159 |
| 0,01 *мкф* | 0,530 | 1,590 | 3,18 | 5,30 | 10,6 | 26,5 | 34 | 79,5 |
| 0,02 *мкф* | 0,265 | 0,795 | 1,59 | 2,65 | 5,30 | 13,2 | 17,0 | 39,8 |
| 0,05 *мкф* | 0,106 | 0,318 | 0,635 | 1,06 | 2,12 | 5,3 | 6,8 | 15,9 |
| 0,1 *мкф* | 0,0530 | 0,1590 | 0,318 | 0,530 | 1,06 | 2,65 | 3,40 | 7,95 |
| 0,2 *мкф* | 0,0265 | 0,0795 | 0,159 | 0,265 | 0,53 | 1,32 | 1,70 | 3,98 |
| 0,5 *мкф* | 0,0106 | 0,0318 | 0,0635 | 0,106 | 0,212 | 0,53 | 0,68 | 1,59 |
| 1 *мкф* | 0,00530 | 0,0159 | 0,0318 | 0,530 | 0,106 | 0,265 | 0,34 | 0,795 |
| 2 *мкф* | 0,00265 | 0,00795 | 0,0159 | 0,0265 | 0,053 | 0,132 | 0,17 | 0,398 |
| 6 *мкф* | 0,00088 | 0,00265 | 0,0053 | 0,0099 | 0,017 | 0,044 | 0,058 | 0,133 |

конденсатор с потерями изображается в виде чистой емкости $\tilde{C}$, к которой параллельно или последовательно подключено активное сопротивление. Наличие активного сопротивления вызывает некоторый сдвиг фаз, и ток опережает напряжение, приложенное к конденсатору, на несколько меньший, чем 90°, угол. Этот сдвиг фаз определяется тангенсом угла $\operatorname{tg}\delta$, где $\delta$ является углом потерь. Практически эта величина представляет отношение эквивалентного последовательного сопротивления к емкостному на рассматриваемой частоте.

Величина потерь для последовательной схемы замещения равна:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_R}{U_C} = R\omega C_R,$$

а для параллельной

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R\omega C_R},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока в цепи.

Величина, обратная $\operatorname{tg}\delta$, называется добротностью конденсатора

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta}$$

и может достигать нескольких тысяч.

Современные конденсаторы (кроме электролитических) характеризуются очень малыми потерями; $\delta \ll 3'$ и $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}01 - 0{,}001$.

У конденсатора с малыми потерями сдвиг фаз между током и напряжением близок к 90°. Поэтому реактивная мощность равна:

$$P_р = UI \sin\varphi \approx UI.$$

Так как ток через конденсатор $I = U\omega C$, то $P_р = U^2\omega C$. Достигаемое значение амплитуды переменного напряжения на конденсаторе, при котором реактивная мощность равна $P_р$, определяется из выражения

$$U_{макс} = 556\sqrt{\frac{P_р}{fC}},$$

где $U_{макс}$ — амплитуда напряжения на конденсаторе, *в*;
$f$ — частота, *Мгц*;
$C$ — емкость конденсатора, *пф*.

Реактивная мощность выражается в реактивных вольт-амперах. При переменных напряжениях выше допустимого происходит перегрев диэлектрика и разрушение конденсатора.

Одним из недостатков конденсаторов является наличие у них индуктивности. Индуктивность слагается из индуктивности рабочего элемента конденсатора и индуктивности внешних и внутренних соединительных проводников. Индуктивность конденсатора зависит от размеров рабочего элемента, его расположения относительно корпуса, длины выводов и др. Присутствие индуктивности увеличивает эквивалентную емкость и вызывает появление резонансных явлений в конденсаторе. На рис. 12 изображена простейшая схема

конденсатора с собственной индуктивностью. При резонансе, т. е. при

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}},$$

сопротивление этой цепи минимально и равно активному сопротивлению потерь. Для частот, отличных от резонансной, полное сопротивление конденсатора имеет реактивный характер; для низких — емкостный, а на высоких — индуктивный.

Нормальное использование конденсатора может происходить лишь на частотах ниже резонансной, на которых он имеет емкост-

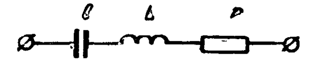



Рис. 12. Эквивалентная схема конденсатора с собственной индуктивностью.

ное сопротивление. Для нормальной работы конденсаторов необходимо выполнение условия

$$f_{макс} = \frac{f_0}{2 \div 3},$$

где $f_{макс}$ — максимальная рабочая частота;

$f_0$ — резонансная частота конденсатора.

Таблица 6

**Индуктивность и максимальные рабочие частоты конденсаторов**

| Тип | $L$, мкгн | $f_{макс}$, Мгц |
|---|---|---|
| Слюдяной, малого размера КСО-1 — КСО-7 | 4—6 | 150—200 |
| Слюдяной, среднего размера КСО-11 | 15—25 | 75—100 |
| Слюдяной, большого размера | 50—100 | 1—1,5 |
| Керамический, дисковый, малого размера КД-1 | 1—1,5 | 2 000—3 000 |
| Керамический, дисковый, среднего размера КД-2, КДУ | 2—4 | 200—500 |
| Керамический, трубчатый, малого размера КТ-1 | 3—10 | 150—200 |
| Керамический, трубчатый, среднего размера КТ-3 | 20—30 | 50—70 |
| Бумажный, малого размера в цилиндрическом корпусе с паяными торцами КБГ-И | 6—11 | 50—80 |
| Бумажный, среднего размера в цилиндрическом корпусе, с непаяными торцами КБГ-М | 30—60 | 3—5 |
| Бумажный, большой емкости | 50—100 | 1—1,5 |
| Переменной емкости, среднего размера, с воздушным диэлектриком | 10—60 | 50—100 |
| Переменной емкости, малого размера | 6—20 | 300—350 |

На частотах, близких к резонансной, индуктивное сопротивление компенсирует емкостное, т. е. способствует уменьшению общего реактивного сопротивления. На частотах выше резонансной реактивное сопротивление конденсатора меняет свой знак и становится индуктивным. Для некоторых типов конденсаторов зависимость $f_0$ от величины емкости и длины выводов показана графически на рис. 13. В табл. 6 приведены величины индуктивности стандартных конденсаторов и их максимальные рабочие частоты.

Другим важным фактором, характеризующим конденсатор, является стабильность. Стабильность конденсатора определяется изменением его основных параметров, главным образом емкости, под воздействием внешней среды. Изменения емкости, вызываемые действием температуры, характеризуются **температурным коэффициентом емкости** (ТКЕ), представляющим относительное изменение емкости при изменении температуры на 1° С:

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_2 - C_1}{C_{20}\Delta t^{\circ}},$$

где $C_2$ — емкость конденсатора при температуре нагрева;

$C_1$ — то же при начальной температуре.

В зависимости от вида конденсатора ТКЕ может быть положительным, отрицательным или близким к нулю; ТКЕ обычно выражается в миллионных долях изменения емкости к одному градусу ($10^{-6}$/° С). По величине ТКЕ конденсаторы подразделяются на группы, которым присвоены цифровые и буквенные символы, а также цвета для окраски корпуса. В табл. 7 приведены группы температурной стабильности стандартных конденсаторов постоянной емкости, а на рис. 14 — зависимость относительного изменения емкости керамических конденсаторов различной окраски от температуры. Температурная зависимость емкости слюдяных конденсаторов обозначается буквами от А до Г. Соответствующие им значения ТКЕ приведены в табл. 7.

Керамические конденсаторы КТ, КД, КДС и др. окрашены в разные цвета, которые характеризуют стабильность их емкости при изменениях температуры. Емкость конденсаторов серого, голубого и синего цветов при изменении температуры изменяется

Таблица 7

**Группы температурной стабильности конденсаторов**

| Группа | ТКЕ, %/*град* | Цвет корпуса |
|---|---|---|
| А | Не нормируется | — |
| Б | ±0,02 | — |
| В | ±0,01 | — |
| Г | ±0,005 | — |
| К | —(0,13±0,02) | Зеленый или красный с зеленой точкой |
| Д | —(0,07±0,01) | Красный |
| Л | —(0,0075±0,003) | Белый |
| М | —(0,005±0,003) | Голубой |
| Р | +(0,003±0,003) | Серый |
| С | +(0,0120±0,003) | Синий |
| Н | Не нормируется | Оранжевый или желтый |

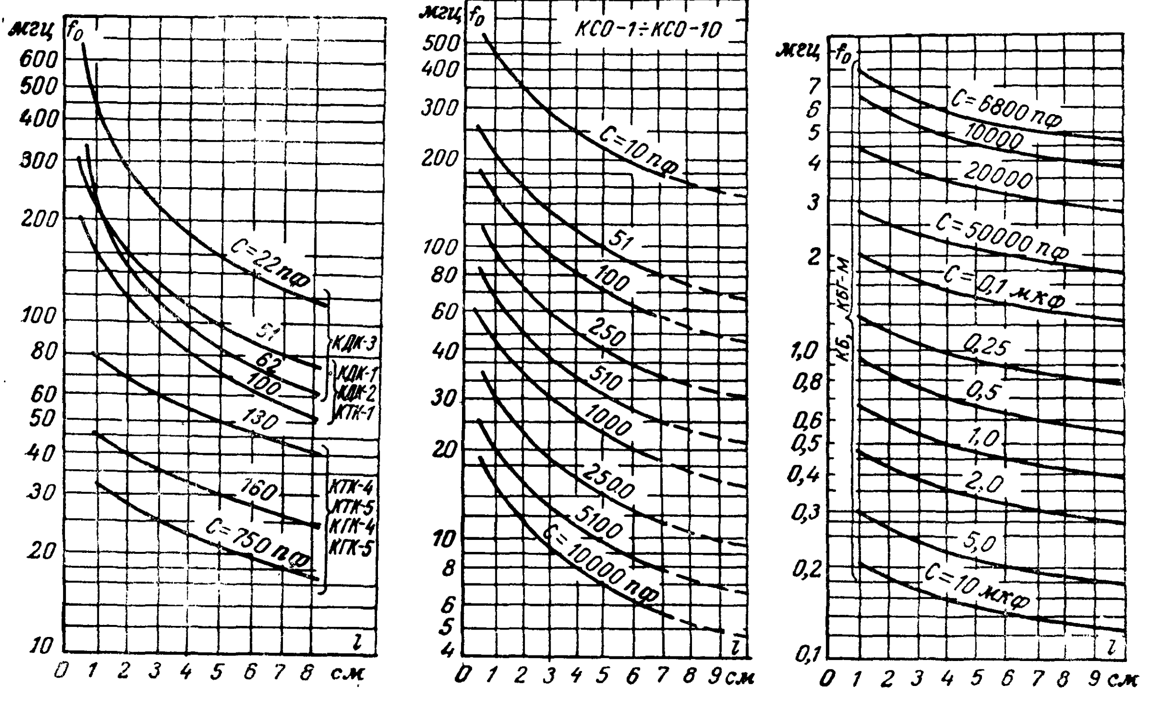



Рис. 13. Графики резонансных частот конденсаторов.

незначительно (рис. 14,*а*), такие конденсаторы называются **термостабильными**. Емкость конденсаторов зеленого и красного цветов при увеличении температуры заметно уменьшается (рис. 14,*б*). Эти конденсаторы называются **термокомпенсирующими**. При использовании в резонансных контурах они дают возможность значительно улучшить стабильность их частоты при колебаниях температуры. Конденсаторы оранжевого цвета при изменениях температуры изменяют емкость в широких пределах.

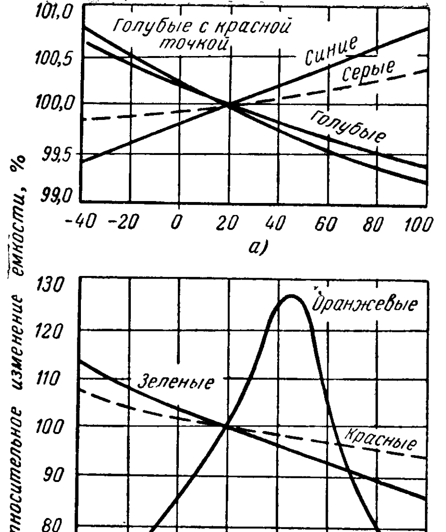



Рис. 14. Изменение емкости керамических конденсаторов различной окраски при изменениях температуры.

*а* — термостабильных; *б* — термокомпенсирующих и сегнетокерамических.

В практике встречаются керамические конденсаторы с нанесенными на них буквами и цифрами. При этом независимо от цвета окраски их корпуса стабильность емкости определяется так: конденсатор с маркировкой П33 или Р соответствует серому конденсатору, с маркировкой М47 или М — голубому, с маркировкой П120 или С — синему, с маркировкой М1300 или К — зеленому, с маркировкой М700 или Д — красному, с маркировкой М75 или Л — голубому с красной точкой, с маркировкой Н70 — оранжевому.

У воздушных конденсаторов переменной емкости ТКЕ обычно во много раз превышает величину температурного коэффициента диэлектрической проницаемости воздуха ($2\cdot10^{-6}$) и для различных конструкций может изменяться в пределах от $+150\cdot10^{-6}$ до $-70\cdot10^{-6}$. Часто поведение конденсаторов при изменении температуры бывает не цикличным, т. е. после нагрева и охлаждения емкость не возвращается к своему первоначальному значению.

## Соединение конденсаторов

На рис. 15 показано последовательное соединение конденсаторов. Общая емкость цепи определяется по формуле

$$\frac{1}{C_{общ}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$

и будет меньше емкости наименьшего конденсатора этой цепи.

Общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

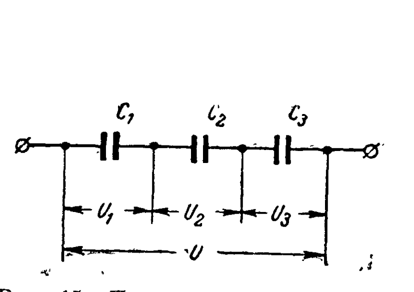



Рис. 15. Последовательное соединение конденсаторов.

Рис. 16. Параллельное соединение конденсаторов.

Напряжения на конденсаторах обратно пропорциональны их емкости:

$$U_1 : U_2 : U_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}.$$

При последовательном соединении конденсаторов одинаковой емкости $C_1$ общая емкость равна:

$$C_{общ} = \frac{C_1}{n}.$$

Емкость двух последовательно соединенных конденсаторов рассчитывается по формуле

$$C_{общ} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

На рис. 16 приведена схема параллельного соединения конденсаторов. Общая емкость цепи равна сумме емкостей всех конденсаторов:

$$C_{общ} = C_1 + C_2 + C_3.$$

На рис. 17 приведена номограмма для расчета общей емкости двух последовательно соединенных конденсаторов. Для расчета по номограмме величины емкостей следует брать в одинаковых единицах.

При параллельном соединении $n$ конденсаторов одинаковой емкости $C_1$ общая емкость равна:

$$C_{общ} = C_1 n.$$

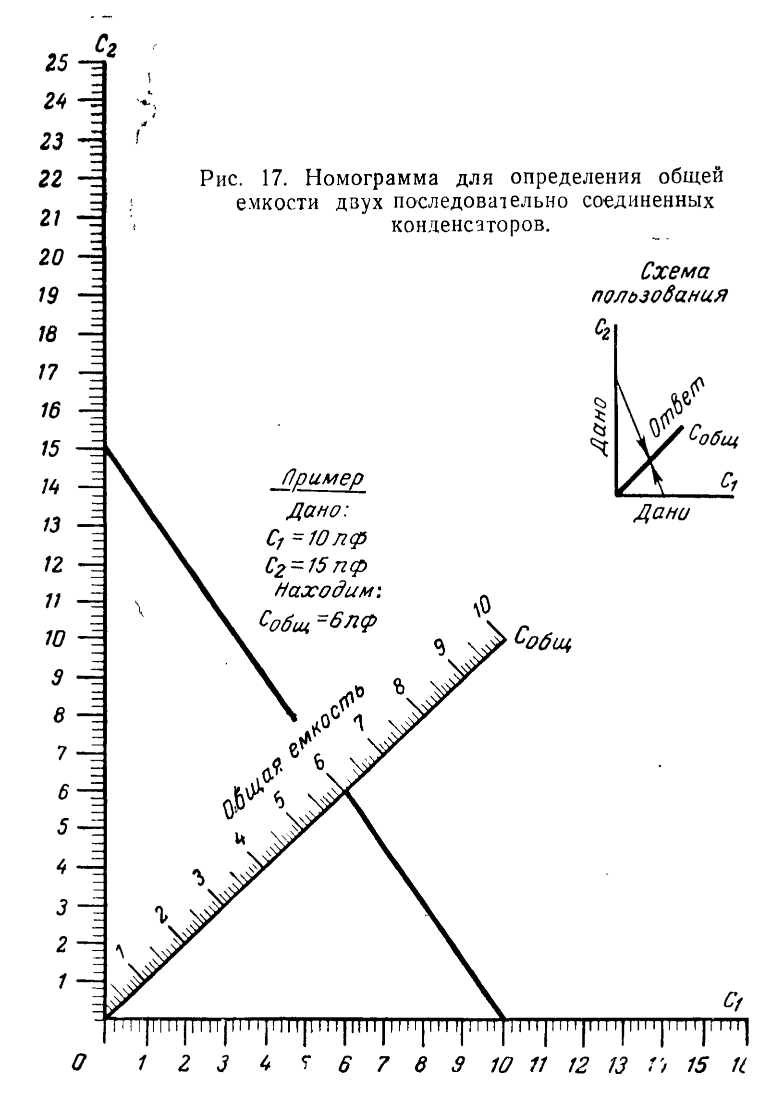



Рис. 17. Номограмма для определения общей емкости двух последовательно соединенных конденсаторов.

## *Глава вторая*

# КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Единица измерения индуктивности — генри. Индуктивностью в 1 *гн* обладает катушка, в которой возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 *в* при изменении тока в катушке на 1 *а* в 1 *сек.*

На практике применяются более мелкие единицы индуктивности — 1 миллигенри $= 10^{-3}$ *гн* и 1 микрогенри $= 10^{-6}$ *гн.*

По своему назначению катушки индуктивности можно разделить на следующие группы: катушки контуров, катушки связи, дроссели высокой частоты и дроссели низкой частоты.

По конструктивному признаку катушки делятся на однослойные и многослойные, экранированные и неэкранированные, катушки с сердечниками и без сердечников, катушки цилиндрические, плоские, тороидальные и печатные.

Катушки индуктивности характеризуются следующими основными параметрами: величиной индуктивности, добротностью, собственной емкостью и стабильностью. Основные параметры катушек индуктивности приведены в табл. 8.

## Расчет индуктивности

Индуктивность прямого провода круглого сечения

$$L = 2l\left(2{,}3\lg\frac{4l}{d} + \frac{d}{2l} - 1\right)10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность, *мкгн*; $l$ — длина провода, *см*; $d$ — диаметр провода, *см*.

На рис. 18 показан график для определения индуктивности прямого провода круглого сечения. Следует отметить, что приведенная формула относится к проводам из немагнитного материала.

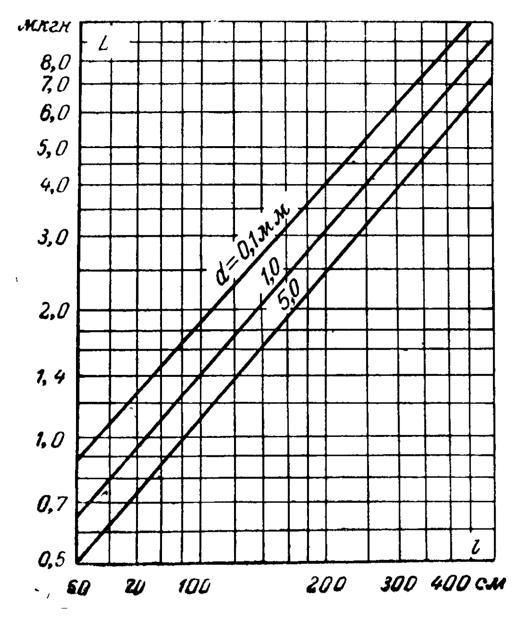



Рис. 18. Индуктивность прямого одиночного провода в зависимости от его длины и диаметра.

Таблица 8

## Основные параметры катушек индуктивности

| Способ намотки и материал каркаса | $\alpha L$, *град*$^{-1}$ | $Q$ | $C_0$, *пф* | Область применения |
|---|---|---|---|---|
| Катушка с осажденной намоткой на керамическом каркасе | $(10 \div 20) \cdot 10^{-6}$ | 80—150 | 0,5—2,0 | Генераторы и гетеродины КВ и УКВ высокой стабильности |
| Катушка с горячей намоткой на керамическом каркасе | $(10 \div 30) \cdot 10^{-6}$ | 100—400 | 0,5—2,0 | То же |
| Катушка с холодной тугой намоткой на керамическом каркасе | $(40 \div 100) \cdot 10^{-6}$ | 100—400 | 0,5—2,0 | Генераторы и гетеродины КВ и УКВ пониженной стабильности |
| Катушка с бескаркасной намоткой | $(50 \div 150) \cdot 10^{-6}$ | 100—600 | 0,5—2,0 | Усилительные каскады УКВ |
| Катушка с однослойной сплошной намоткой и каркасом из органического диэлектрика | $(100 \div 200) \cdot 10^{-6}$ | 80—200 | 3—5 | Генераторы и гетеродины низкой стабильности, усилительные каскады СВ и КВ |
| Катушка с намоткой типа „универсаль" | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 50—100 | 5—10 | Гетеродины низкой стабильности и усилительные каскады ДВ и СВ |
| Катушка с перекрестной универсальной намоткой | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 30—50 | 15—30 | То же |
| Катушка с секционированной намоткой (3—4 секции) | $(150 \div 300) \cdot 10^{-6}$ | 150—170 | 5—10 | „ „ |
| Катушка с несекционированной намоткой | | 20—30 | 10—50 | Дроссели высокой частоты |

Индуктивность цепи из двух длинных параллельных проводов круглого сечения

$$L = 4l\left(2,3\lg\frac{2D}{d} - \frac{D}{l}\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность, *мкгн;*

$D$ — расстояние между осями проводов, *см.*

На рис. 19 приведена зависимость индуктивности двухпроводной линии от отношения $D/d$. Кривая дает значения индуктивности, отнесенные к 1 *м* длины линии.

Индуктивность цепи из двух длинных проводов прямоугольного сечения

$$L = 4l\left(2,3\lg\frac{D}{a+b} - \frac{D}{l} + 0,223\frac{a+b}{l} + 1,5\right)\cdot 10^{-3},$$

где $D$ — расстояние между центрами сечений, *см*;

$a$ и $b$ — размеры сечения, *см.*

Индуктивность коаксиального кабеля

$$L = 2l\ln\frac{D}{d}10^{-3},$$

где $D$ — диаметр наружного провода, *см*;

$d$ — диаметр внутреннего провода, *см.*

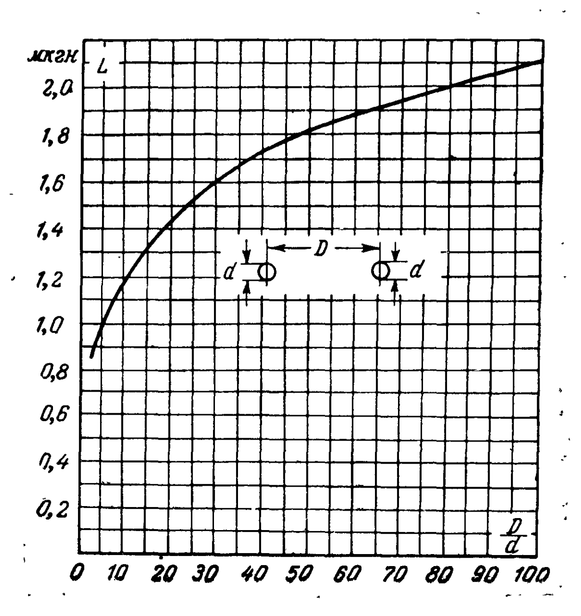



Рис. 19. Индуктивность отрезка двухпроводной линии длиной 1 *м.*

Индуктивность одиночного круглого витка из провода круглого сечения

$$L = 6,28D\left(2,3\lg\frac{8D}{d} - 2\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$D$ — диаметр витка, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Эта формула дает точные результаты для токов высокой частоты. Для токов низкой частоты лучшие результаты получаются при использовании формулы

$$L = 6,28D\left(2,3\lg\frac{8D}{d} - 1,5\right)\cdot 10^{-3}.$$

На рис. 20 показан график зависимости индуктивности круглого витка от диаметра витка $D$ и диаметра провода $d$. График составлен для высоких частот.

Индуктивность круглого витка из провода прямоугольного сечения (ленты)

$$L = 6,28D\left[2,3\left(1 + \frac{b^2}{8D^2}\right)\lg\frac{4D}{b} + \frac{b^2}{32D^2} - 0,5\right]\cdot 10^{-3},$$

где $b$ — ширина ленты, *см*.

При $D \gg b$ эта формула может быть упрощена:

$$L \approx 6,28D\left(2,3\lg\frac{4D}{b} - 0,5\right)\cdot 10^{-3}.$$

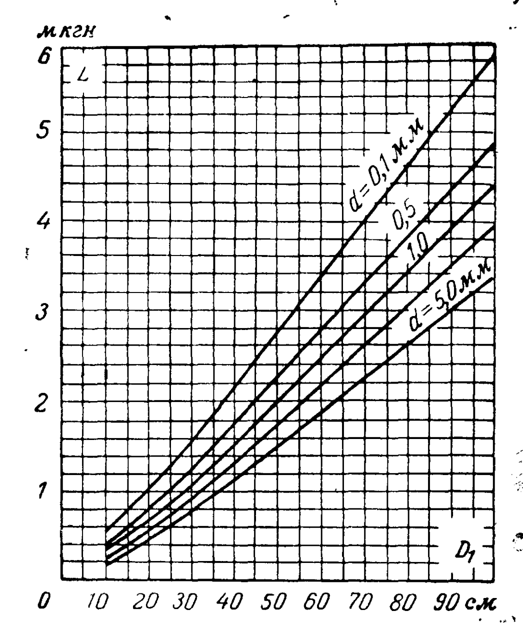



Рис. 20. Индуктивность круглого витка из провода круглого сечения.

Индуктивность прямоугольного витка из провода круглого сечения

$$L=\left\{9,2\left[(a+b)\lg\frac{4ab}{d}-a\lg(a+c)-b\lg(b+c)\right]+\right.$$
$$\left.+8\left[c-a-b+\frac{d}{2}\right]\right\}\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$a$ и $b$ — длины сторон прямоугольника, *см*;
$c$ — его диагональ, равная $\sqrt{a^2+b^2}$, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Индуктивность квадратного витка из провода круглого сечения

$$L=8a\left(2,3\lg\frac{2a}{d}+\frac{d}{2a}-0,77\right)\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$a$ — сторона квадрата, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

Таблица 9

**Индуктивность квадратного витка**

| Сторона квадрата, *см* | Индуктивность, *мкгн* | | | Сторона квадрата, *см* | Индуктивность, *мкгн* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$=1 *мм* | $d$=2 *мм* | $d$=3 *мм* | | $d$=1 *мм* | $d$=2 *мм* | $d$=3 *мм* |
| 10 | 0,385 | 0,327 | 0,271 | 50 | 2,550 | 2,280 | 2,000 |
| 15 | 0,621 | 0,533 | 0,455 | 60 | 3,150 | 2,820 | 2,490 |
| 20 | 0,875 | 0,764 | 0,653 | 70 | 3,760 | 3,760 | 2,980 |
| 25 | 1,140 | 0,999 | 0,860 | 80 | 4,380 | 3,940 | 3,500 |
| 30 | 1,410 | 1,240 | 1,080 | 90 | 5,010 | 4,520 | 4,020 |
| 40 | 1,970 | 1,750 | 1,530 | 100 | 5,660 | 5,100 | 4,550 |

В табл. 9 приводятся значения индуктивности, вычисленные для различных размеров квадратного витка при разных диаметрах провода.

Для катушек с индуктивностью выше 15—20 *мкгн* применяется сплошная однорядная намотка. Целесообразность перехода на сплошную намотку определяется диаметром катушки. Ориентировочные значения индуктивности катушки заданного диаметра, при которых целесообразен переход на сплошную намотку, приведены в табл. 10.

Индуктивность однослойной катушки со сплошной намоткой, изготовленной на цилиндрическом каркасе, может быть рассчитана по следующим трем эмпирическим формулам:

$$L=\frac{D^2w^2}{1\,000l+440D};\quad L=\frac{0,02D^2w^2}{9D+20l};\quad L=\frac{0,01D^2w^2}{4D+11l},$$

где $L$ — индуктивность витка, *мкгн*;
$D$ — диаметр катушки, *мм*,
$w$ — число витков;
$l$ — длина намотки, *мм*.

Первая и вторая формулы применимы для расчетов при $l>D/2$, а третья — при $l\leqslant D/2$.

Индуктивность однослойной катушки со сплошной намоткой можно определить по универсальной формуле, которая пригодна для расчетов при любых соотношениях конструктивных размеров катушки

$$L=\frac{0,01Dw^2}{\frac{l}{D}+0,44},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$l$ — длина намотки, *см*;
$w$ — число витков катушки.

Таблица 10

**Максимальная индуктивность для однослойной намотки**

| Диаметр каркаса, *мм* . . . | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|
| Максимальная индуктивность, *мкгн* . . . . . . . | 30 | 50 | 100 | 200 | 500 |

Диаметр катушки $D$ представляет собой диаметр окружности, образуемой осевой линией активного сечения провода. На высоких частотах можно с высокой точностью диаметр $D$ принять равным внутреннему диаметру витков, т. е. диаметру каркаса. Длина намотки $l$ представляет собой расстояние между осевыми линиями крайних витков.

На рис. 21 показана номограмма, позволяющая ускорить расчет величины индуктивности катушек по приведенной формуле.

Индуктивность катушек с сечением в форме многоугольника рассчитывается по формулам для цилиндрических катушек, при этом считается, что многоугольная катушка эквивалентна по индуктивности цилиндрической с равновеликим по площади круглым сечением.

Эквивалентный диаметр многоугольной катушки рассчитывается по формуле

$$D=D_0\sqrt{\frac{N}{6,28}\sin\frac{6,28}{N}},$$

где $D_0$ — диаметр описанной вокруг многоугольника окружности;
$N$ — число сторон многоугольника.

Индуктивность катушки, намотанной с шагом проводом круглого сечения, равна:

$$L=L'-6,28wD(A+B)\cdot 10^{-3},$$

где $L'$ — индуктивность катушки, найденная без поправки на шаг, *мкгн*;
$A$ и $B$ — поправочные коэффициенты (рис. 22,*а*, *б*);
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$w$ — число витков.

Приведенный расчет дает достаточно точные результаты для катушек с числом витков не менее 4—5.

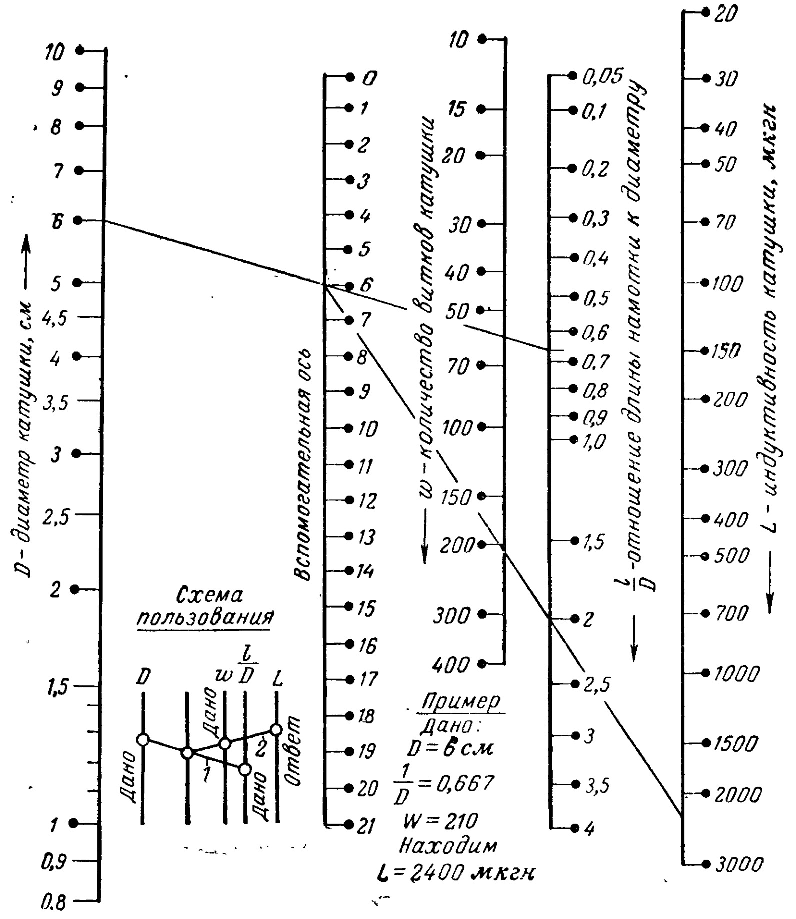



Рис. 21. Номограмма для расчета индуктивности однослойных катушек.

Индуктивность плоской катушки может быть приближенно определена по формулам для цилиндрической катушки с таким же числом витков и шагом намотки, имеющей диаметр, равный среднему диаметру плоской катушки.

Индуктивность плоской печатной катушки со спиральными витками (рис. 23,*а*) может быть определена с точностью 5% по формуле

$$L = 24{,}75 D_{ср} \sqrt[3]{w^5} \lg \frac{4D_{ср}}{t} 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

$D_{ср}$ — средний диаметр спирали, *см*;

$t$ — радиальная ширина намотки, *см*;

$w$ — число витков.

Для менее точного расчета можно воспользоваться следующей формулой:

$$L = r_1 w^2 k,$$

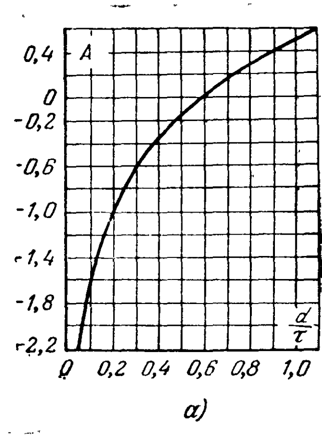
где $L$ — индуктивность, *мкгн*;

$r_1$ — радиус внешнего витка спирали, *см*;

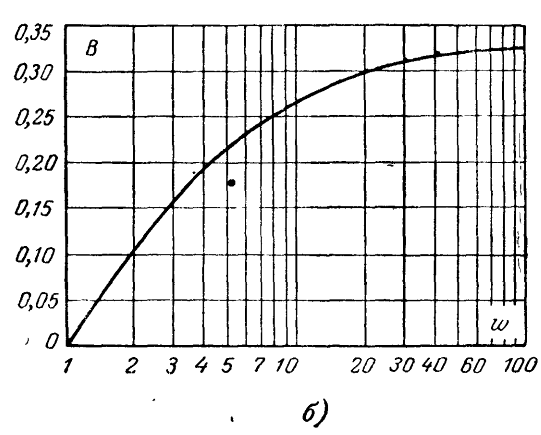
$w$ — число витков;

$k$ — коэффициент, зависящий от отношения радиусов витков спирали $r_1$ и $r_2$, определяемый по графику на рис. 24.

Практически $L_{макс} = 0{,}1$ *мгн*.




а)




б)

...с. 22. Значения поправочных коэффициентов $A$ и $B$.

Индуктивность плоской печатной катушки, витки которой расположены по сторонам квадрата (рис. 23,*б*), равна:

$$L = 55,5a\sqrt[3]{w^5}\lg\frac{8a}{t}10^{-3},$$

где $a$ — длина средней стороны квадрата, *см*;
$t$ — радиальная ширина намотки.

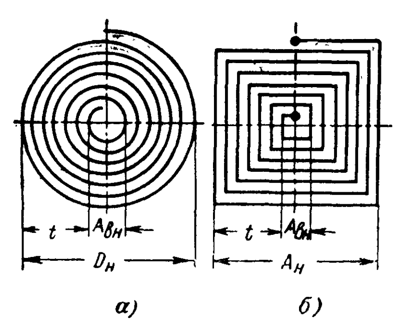



Рис. 23. Печатные спиральные катушки.

*а* — с круглыми витками; *б* — с квадратными витками.

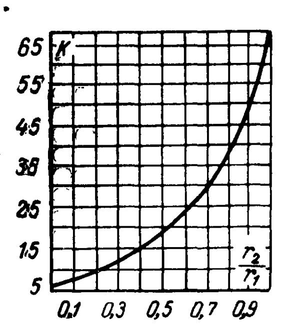



Рис. 24. График значений коэффициента $k$.

Из рис. 23 очевидно, что

$$D_{ср} = 0,5(D_н + D_{вн});\ t = 0,5(D_н - D_{вн})$$

или

$$t = 0,5(A_н - A_{вн}).$$

## Многослойные катушки

Многослойные катушки применяются при индуктивности выше 200—500 *мкгн*. Многослойные катушки могут быть разделены на простые и сложные. К простым намоткам относится рядовая многослойная намотка, при которой витки укладываются на каркас правильными рядами, и намотка «внавал», при которой нет определенной закономерности в расположении витков и слоев.

Широкое распространение получили сложные многослойные намотки. Одной из распространенных сложных намоток является универсальная, при которой витки не располагаются параллельно друг другу, а идут попеременно от одного края к другому, пересекаясь под некоторым углом.

Размеры многослойной катушки определяются величиной наружного диаметра $D$, внутреннего $D_0$ и длиной намотки $l$ (рис. 25).

Радиальную глубину намотки $t$ можно принять равной

$$t = \frac{D - D_0}{2}.$$

Средний диаметр катушки

$$D_{\text{ср}}=0{,}5(D_0+D).$$

Для простой рядовой многослойной намотки и намотки «внавал» радиальная глубина намотки равна:

$$t=\frac{\alpha d_0^2 w}{l},$$

где $\alpha$ — коэффициент неплотности, значения которого приведены в табл. 11;

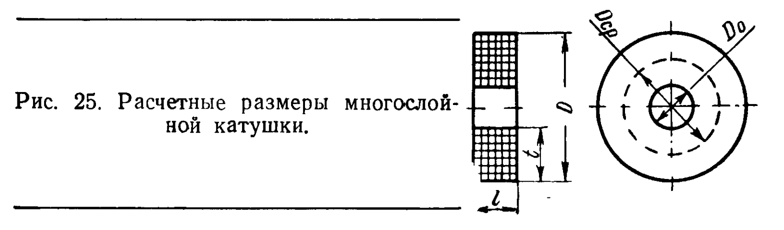



Рис. 25. Расчетные размеры многослойной катушки.

$d_0$ — диаметр провода с изоляцией, *мм*;
$l$ — длина намотки, *мм*;
$w$ — число витков катушки.

Таблица 11

**Значения коэффициента неплотности $\alpha$**

| Диаметр провода без изоляции, *мм* | 0,08—0,11 | 0,15—0,25 | 0,35—0,41 | 0,51—0,93 | Свыше 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 1,3 | 1,25 | 1,2 | 1,1 | 1,05 |

Индуктивность многослойной катушки может быть рассчитана по формуле

$$L=\frac{0{,}08D_{\text{ср}}^2 w}{3D_{\text{ср}}+9l+10t},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$D_{\text{ср}}$ — средний диаметр намотки, *см*;
$l$ — длина намотки, *см*;
$t$ — радиальная глубина намотки, *см*.

На рис. 26 приведена номограмма для расчета величины индуктивности многослойных катушек.

Индуктивность многослойной катушки можно определить по следующей упрощенной формуле:

$$L=L_0 w^2 D\cdot 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;
$L_0$ — поправочный коэффициент.

Величина коэффициента $L_0$ зависит от отношения длины намотки к среднему диаметру катушки $l/D_{ср}$ и от отношения толщины катушки к среднему диаметру $t/D_{ср}$. Значения коэффициента $L_0$ для многослойных катушек приведены на рис. 27,*а—в*.

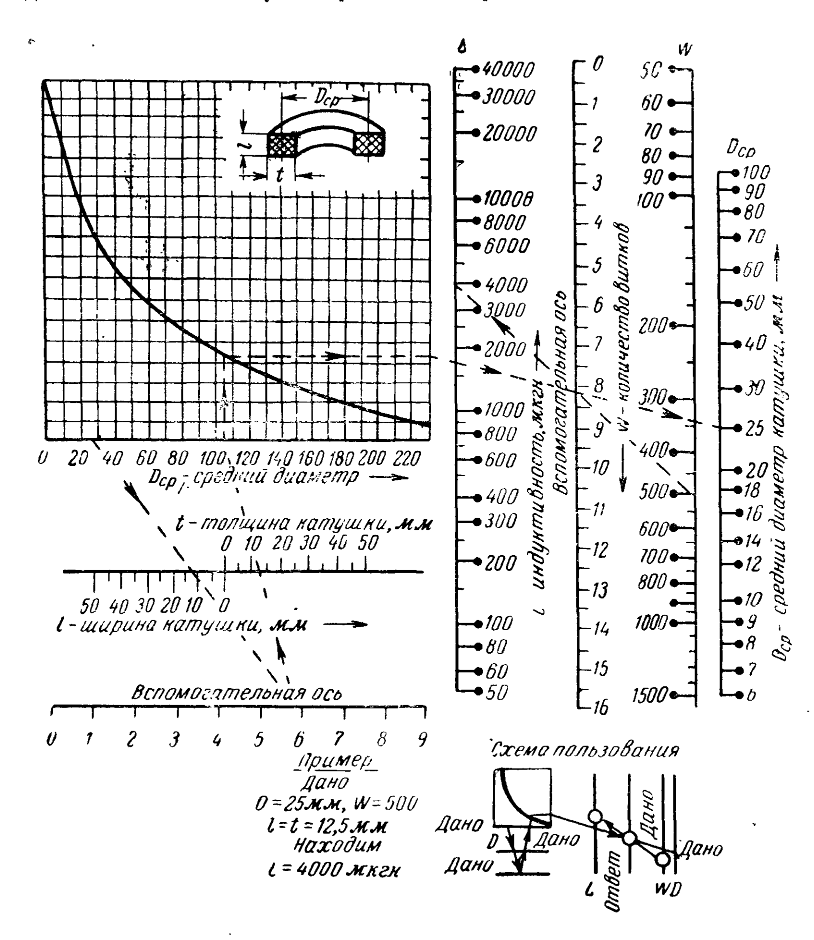



Рис. 26. Номограмма для расчета индуктивности многослойных катушек.

На рис. 28 показана секционированная катушка индуктивности, характеризующаяся достаточно высокой добротностью. Каждая секция этой катушки представляет собой обычную многослойную катушку с небольшим числом витков. Число секций может быть от двух до восьми.

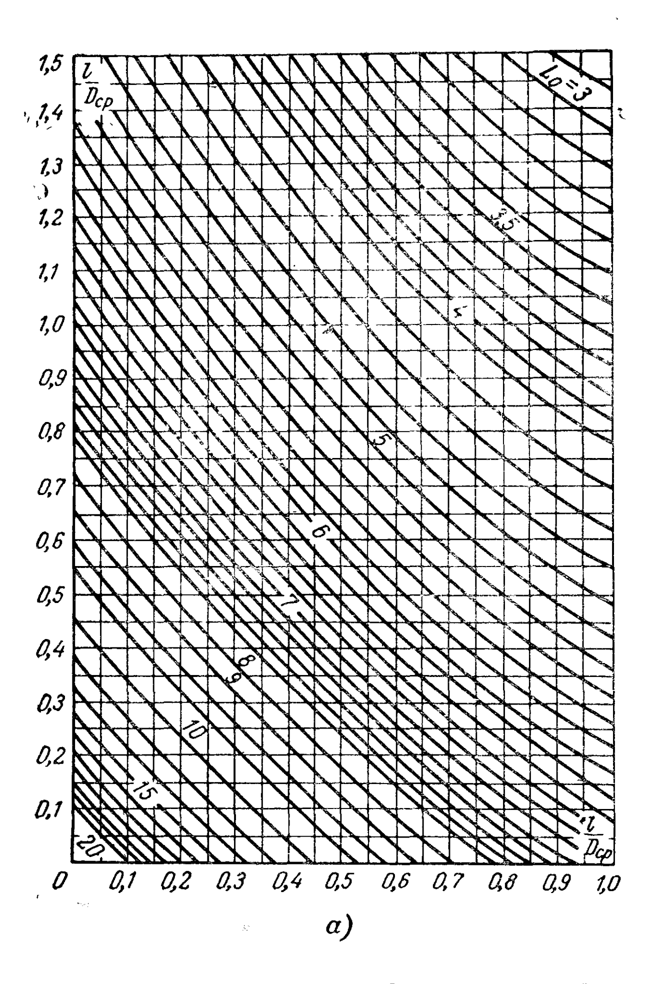
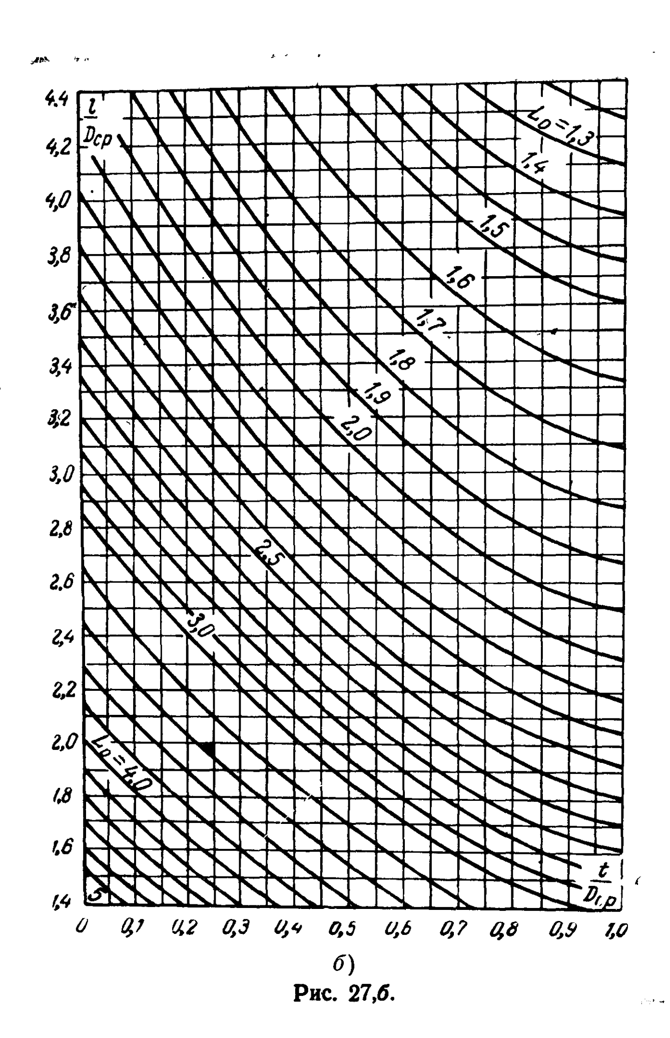



Рис. 27,*а*. График значений $L_0$ для многослойных катушек.



$\frac{l}{D_{cp}}$
4,4
4,2
4,0
3,8
3,6
3,4
3,2
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
$L_0=1,3$
1,4
1,5
1,6
1,7
1,8
1,9
2,0
2,5
3,0
$L_0=4,0$
5
$\frac{t}{D_{cp}}$
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0


*б*)

**Рис. 27,б.**

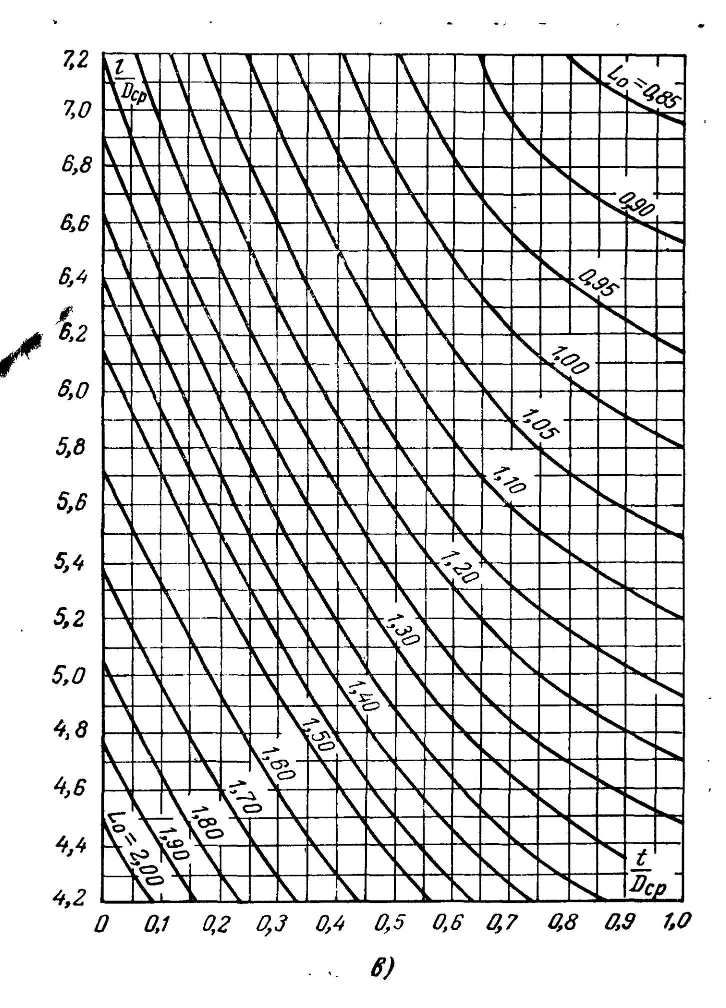



Рис. 27,*в*.

Индуктивность секционированной катушки, состоящей из *n* секций, рассчитывается по формуле

$$L = L_c\,[n + 2k(n-1)],$$

где $L_c$ — индуктивность секции;

$k$ — коэффициент связи между секциями.

Коэффициент $k$ зависит от размеров секций и расстояния между ними. Эта зависимость представлена графически на рис. 29.

Отношение $b/D_{ср}$ выбирается в таких пределах, чтобы величина $k$ была равна 0,2—0,4. Расчет каждой секции производится обычным способом.

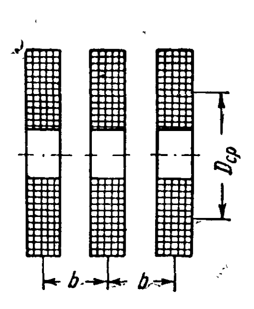



Рис. 28. Секционированная катушка индуктивности.

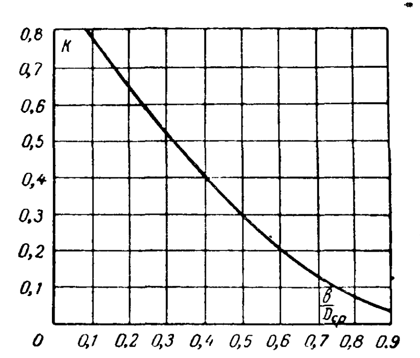



Рис. 29. График значений коэффициента связи $k$ для секционированных катушек.

## Экранированные катушки

При помещении катушки в металлический экран взаимная индуктивность между витками катушки и короткозамкнутыми цепями, образованными экраном, приводит к уменьшению величины индуктивности катушки. Кроме того, увеличиваются собственная емкость и сопротивление катушки.

Уменьшение индуктивности катушки при помещении ее в экран (рис. 30) может быть рассчитано по формуле

$$L_э = L_0 \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_э}\right)^3\right] \left[1 - \left(\frac{l_0}{2l_э}\right)^2\right],$$

где $L_э$ — индуктивность экранированной катушки;

$L_0$ — индуктивность катушки без экрана;

$D_0/D_э$ — отношение диаметра обмотки к диаметру экрана;

$l_0/2l_э$ — отношение длины намотки к удвоенной длине экрана.

Размеры на рис. 30 должны быть выражены в сантиметрах.

На рис. 31 приведена связь между уменьшением индуктивности катушки при помещении ее в экран и относительной величиной диаметра экрана.

Индуктивность экранированной катушки может быть рассчитана по следующей формуле:

$$L_э = L_0 (1 - k^2),$$

где $L_0$ — индуктивность катушки без экрана;

$k$ — коэффициент связи между катушкой и экраном.

При однослойных и тонких многослойных катушках коэффи-

циент связи $k$ рассчитывается по формуле

$$k=\sqrt{\eta\left(\frac{D_0}{D_э}\right)^3},$$

где $D_0$ — диаметр катушки;

$D_э$ — диаметр экрана;

$\eta$ — коэффициент, зависящий от отношения $l/D_0$ катушки, значения которого приведены на рис. 32.

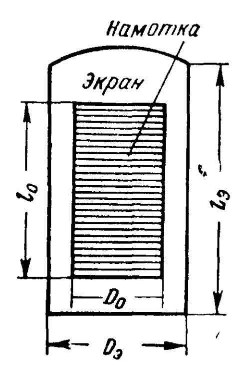



Рис. 30. Экранированная катушка.

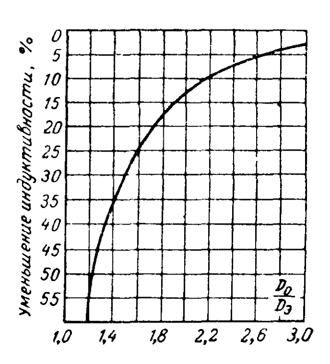



Рис. 31. График изменения индуктивности катушки в зависимости от размеров экрана.

На рис. 33 показан график для приближенного расчета величины индуктивности экранированных однослойных и тонких многослойных катушек. График представляет зависимость отношения индуктивности экранированной катушки к индуктивности катушки без экрана от соотношения геометрических размеров катушки и экрана.

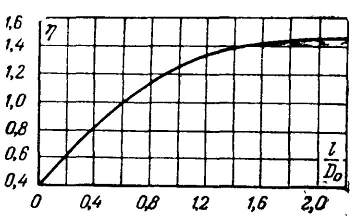



Рис. 32. График значений коэффициента $\eta$.

Влияние экрана на параметры катушки проявляется тем сильнее, чем ближе его стенки расположены к обмотке. Для того чтобы индуктивность и добротность катушки падали не более чем на 10%, рекомендуются следующие соотношения между диаметрами экрана и катушки: для однослойных катушек $D_э/D_0=1{,}6\div2{,}5$, причем для коротких катушек $D_э/D_0=1{,}5\div1{,}8$. Для катушек с повышенной стабильностью $D_э/D_0\geqslant2{,}5$.

Экраны выполняются в виде круглых или прямоугольных стаканов из алюминия, меди или латуни. Толщина стенок экрана зависит от материала экрана и частоты, при которой работает катушка. Могут быть рекомендованы следующие толщины стенок экрана в миллиметрах.

| Частота, *Мгц* | Из меди | Из алюминия |
|---|---|---|
| 0,1 | 0,98 | 1,30 |
| 1,0 | 0,31 | 0,40 |
| 10,0 | 0,10 | 0,13 |
| 100,0 | 0,03 | 0,04 |

Экранировать следует катушки большого размера, диаметр которых не менее 15—25 *мм*. Катушки диаметром 4—5 *мм*, удален-

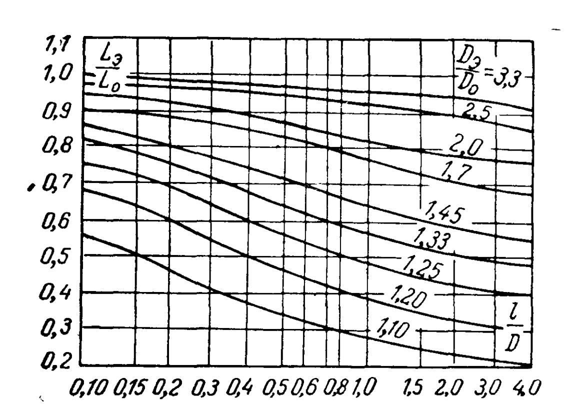



Рис. 33. График для расчета индуктивности однослойных и тонких многослойных экранированных катушек.

ные от других деталей на расстояния в 4—5 раз бо́льшие их диаметра, обычно в экранировании не нуждаются, так как они создают поле в относительно небольшом пространстве.

## Собственная емкость катушек индуктивности

Между витками в катушке индуктивности, помимо магнитного, существует также электрическое поле, которое влияет на собственную емкость катушки. Собственная емкость изменяет параметры катушек, понижает добротность и стабильность. Частота, на которую оказывается настроенным контур, состоящий из индуктивности и собственной емкости, называется собственной частотой катушки.

Величина собственнной емкости определяется типом намотки и размерами катушки. Наименьшей собственной емкостью (1—2 *пф*) обладают однослойные катушки, намотанные с шагом. Из числа многослойных катушек наименьшей собственной емкостью обладают секционированные катушки. Это объясняется тем, что собственные емкости каждой секции соединяются между собой последовательно и результирующая емкость уменьшается.

Собственная емкость катушки, у которой длина намотки не больше диаметра намотки, определяется по формуле

$$C_0 \approx \frac{6,28D}{3,6 \operatorname{arccos} h \frac{\tau}{d}}.$$

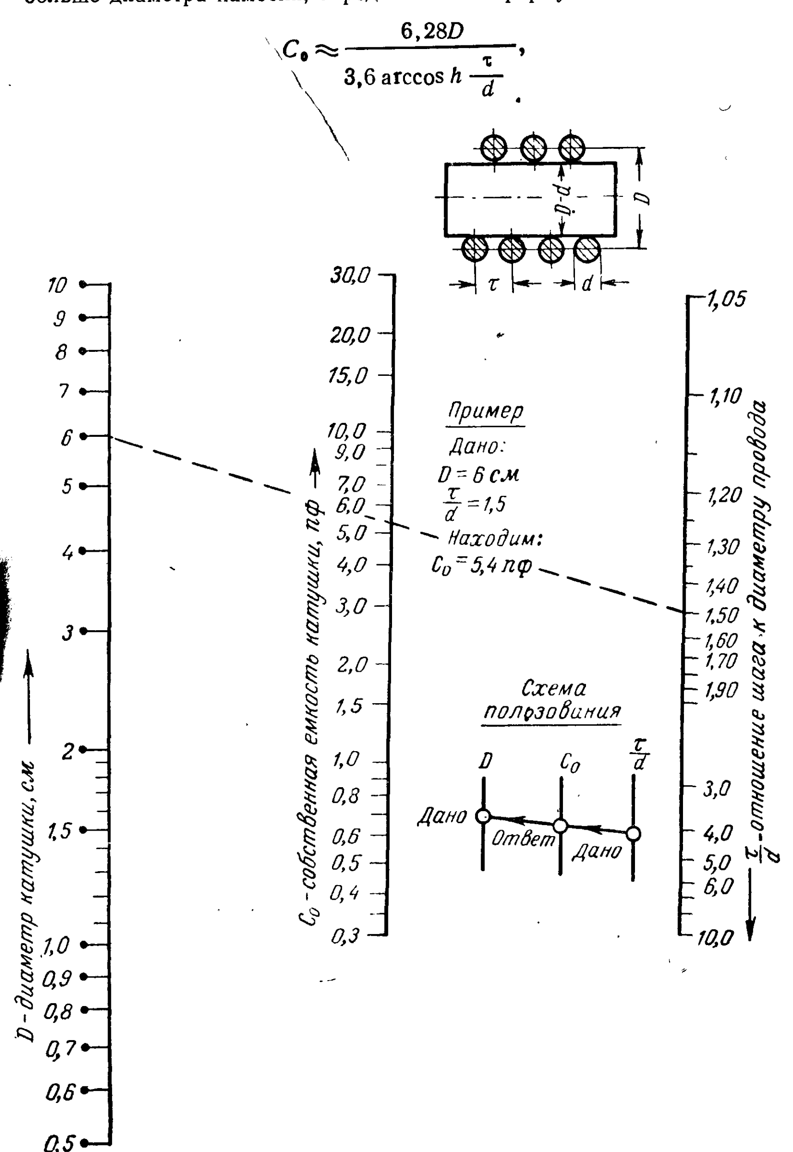



Рис. 34. Номограмма для расчета собственной емкости однослойных катушек, намотанных с принудительным шагом.

где $C_0$ — собственная емкость катушки, *пф*;
$D$ — диаметр намотки, *см*;
$\tau$ — шаг намотки, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*.

На рис. 34 показана номограмма для определения собственной емкости однослойных катушек, намотанных с шагом. Собственную

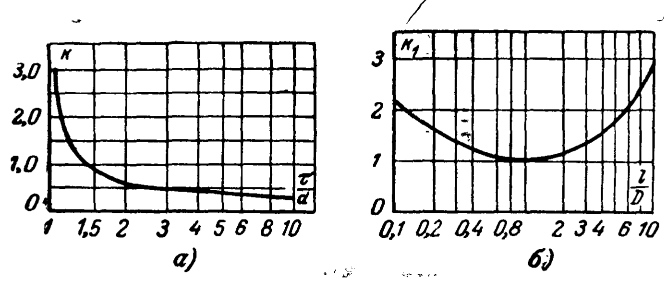



Рис. 35. Графики значений коэффициентов $k$ и $k_1$ для расчета собственной емкости однослойных катушек.

емкость катушки, намотанной с большим шагом, можно принять равной

$$C_0 \approx 0{,}5D;$$

для катушки, намотанной виток к витку,

$$C_0 \approx 1{,}5D.$$

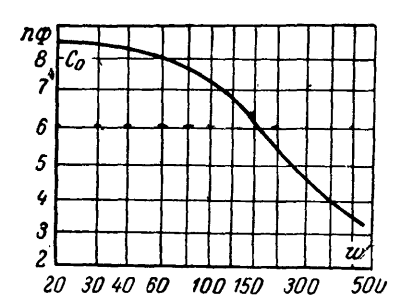



Рис. 36. График зависимости собственной емкости универсальных катушек от числа витков.
$D = 10 \div 20$ *мм*; $l = 2 \div 6$ *мм*; $t = 1 \div 8$ *мм*.

Расчет величины собственной емкости однослойных катушек можно производить по следующей формуле:

$$C_0 \approx kk_1D,$$

где $D$ — диаметр катушки, *см*;
$k$ — коэффициент, зависящий от соотношения между шагом намотки и диаметром провода (рис. 35,*а*);

$k_1$ — коэффициент, зависящий от соотношения между длиной и диаметром катушки (рис. 35,*б*).

Собственная емкость секционированной катушки при расстояниях между секциями, примерно равных длине намотки, равна:

$$C_0 = C_c \frac{0,33n + 0,67}{n},$$

где $C_c$ — собственная емкость отдельной секции, *пф*;

$n$ — число секций.

На рис. 36 показан график зависимости собственной емкости универсальных катушек от числа витков.

## Взаимная индуктивность и коэффициент связи

Для обеспечения магнитной связи между катушками их располагают так, чтобы оси катушек были параллельны, совпадали или пересекались под острым углом. Если оси двух катушек индуктивности пересекаются под прямым углом, то магнитная связь между ними практически отсутствует. На рис. 37 показаны некоторые варианты взаимного расположения катушек индуктивности.

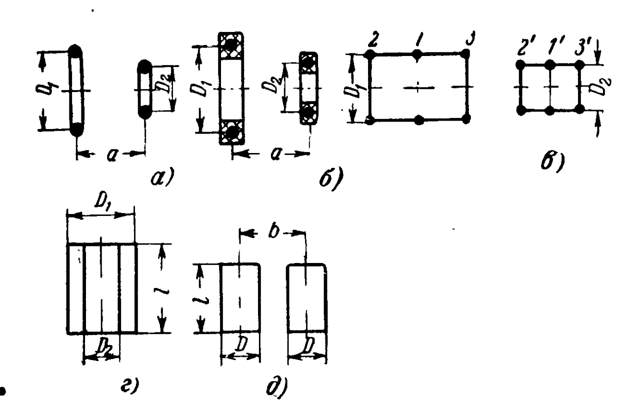



Рис. 37. К расчету взаимной индуктивности между катушками.

Взаимная индуктивность между смежными коаксиальными витками (рис. 37,*а*) равна:

$$M \approx D_1 \varphi \cdot 10^{-3},$$

где $M$ — взаимная индуктивность, *мкгн*;

$D_1$ — диаметр большего витка, *см*;

$\varphi$ — коэффициент, зависящий от соотношения размеров витков и расстояния между ними (рис. 38,*а*—*в*).

Взаимная индуктивность между смежными коаксиальными катушками с квадратным или близким к нему сечением (рис. 37,*б*) равна:

$$M = w_1 w_2 M_0,$$

где $w_1$ и $w_2$ — числа витков катушек;

$M_0$ — взаимная индуктивность между центральными витками, определяемая по формуле для рис. 37,*а*.

Взаимная индуктивность между длинными однослойными катушками, расположенными близко друг к другу (рис. 37,*в*), равна:

$$M = w_1 w_2 D_1 \varphi_0 \cdot 10^{-3},$$

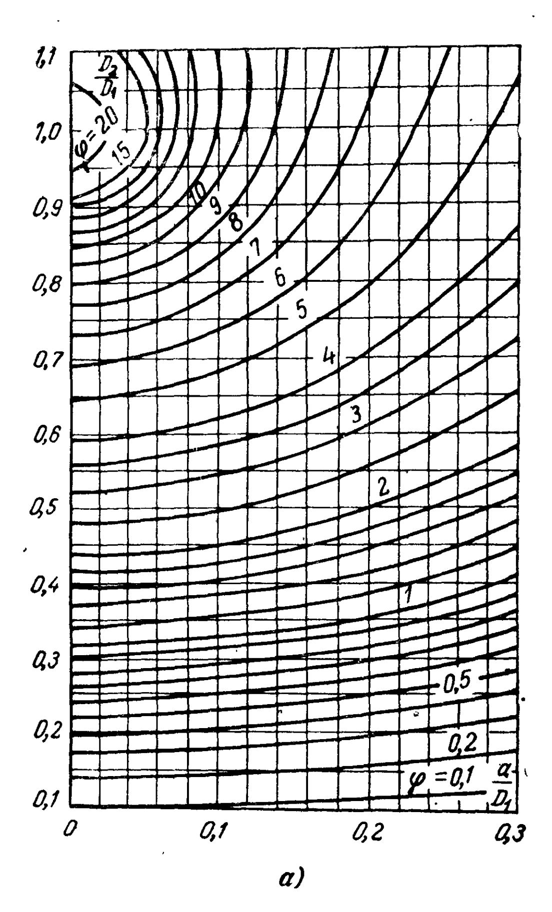
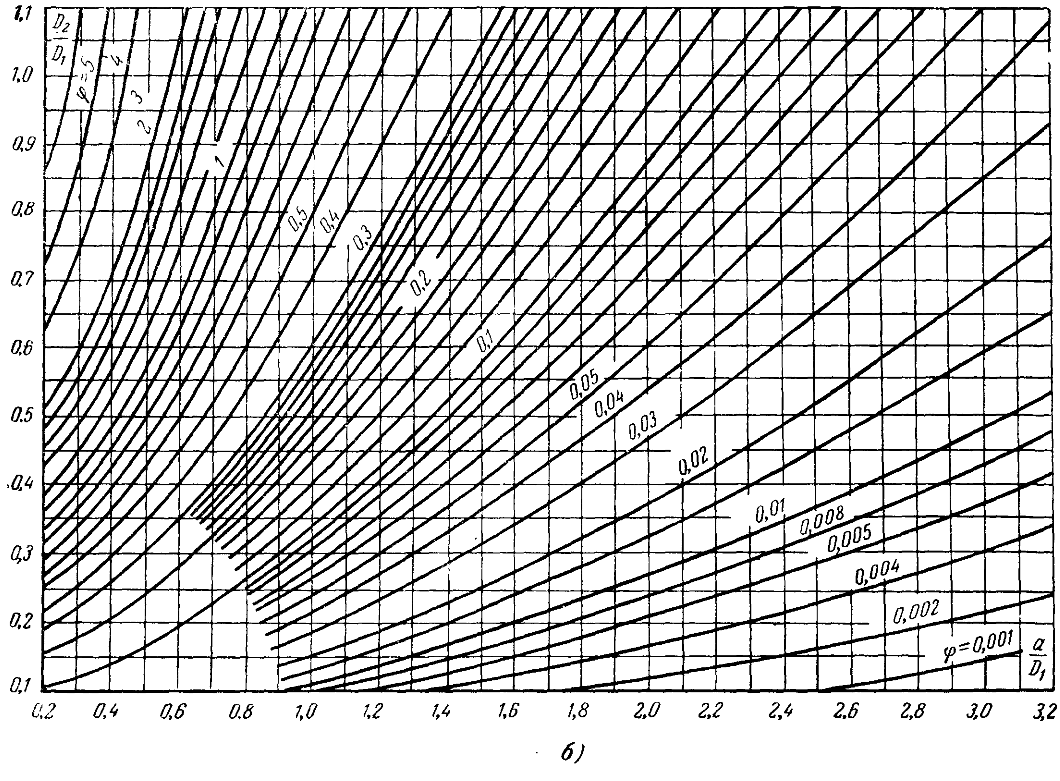


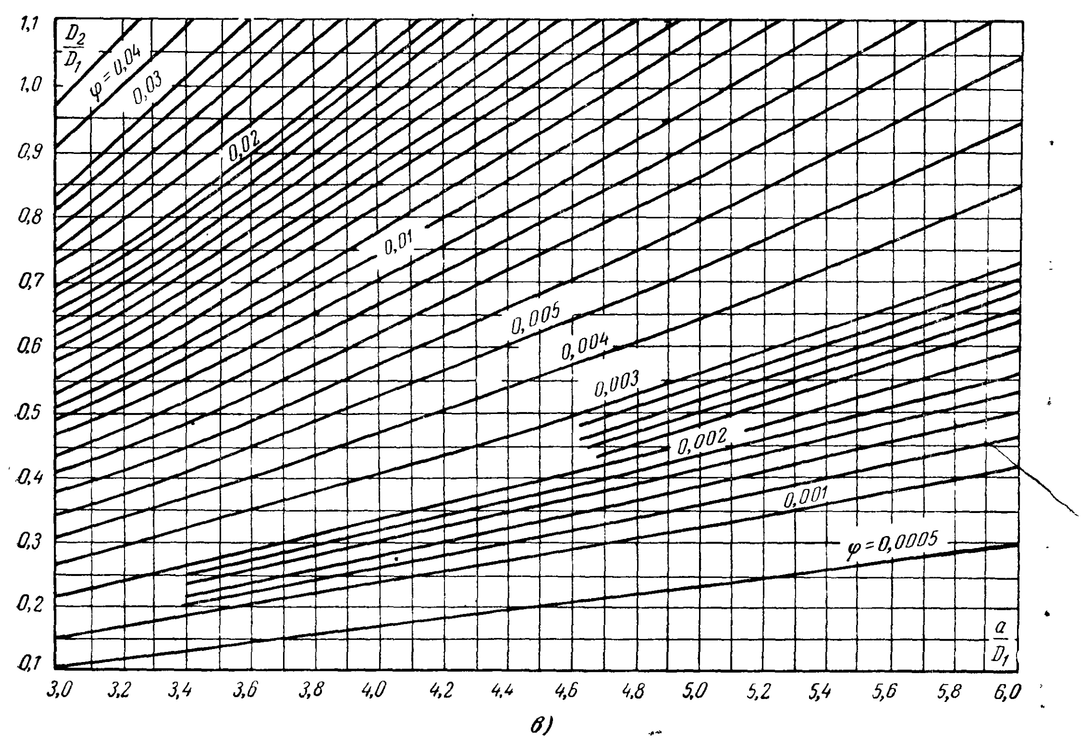

Рис. 38,*а*. График значений коэффициента φ.

4—2585




*б)*

Рис. 38,*б*.



$\frac{D_2}{D_1}$
φ = 0,04
0,03
0,02
0,01
0,005
0,004
0,003
0,002
0,001
φ = 0,0005
$\frac{a}{D_1}$
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
3,0
3,2
3,4
3,6
3,8
4,0
4,2
4,4
4,6
4,8
5,0
5,2
5,4
5,6
5,8
6,0


*в)*

Рис. 38,*в*.

где

$$\varphi_0 = \frac{1}{6}(2\varphi_{11'} + \varphi_{12'} + \varphi_{13'} + \varphi_{1'2} + \varphi_{1'3})$$

есть среднее арифметическое значение $\varphi$.

Взаимная индуктивность между однослойными катушками одинаковой длины, расположенными одна внутри другой (рис. 37,*г*), равна:

$$M = w_1 w_2 \psi \sqrt{D_1 D_2} \cdot 10^{-3},$$

где $\psi$ — коэффициент, определяемый из графика на рис. 39.

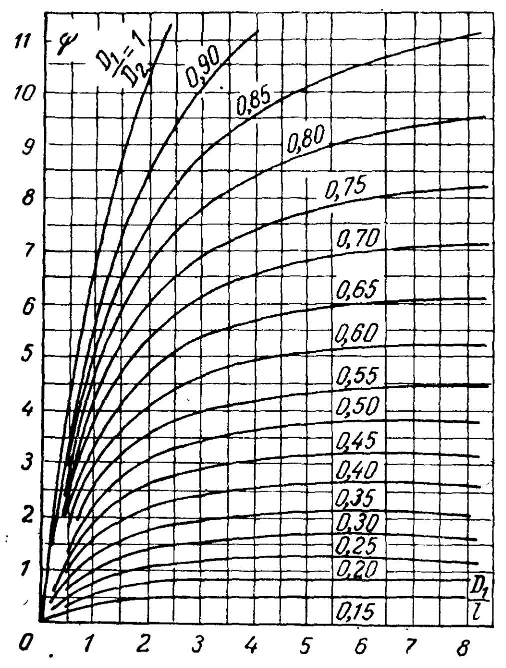



Рис. 39. График значений коэффициента $\psi$.

Взаимная индуктивность между катушками одинакового размера, оси которых параллельны (рис. 37,*д*), равна:

$$M = \frac{0,6 w_1 w_2 D^4}{b^3} \cdot 10^{-3}.$$

Взаимная индуктивность между обмотками, расположенными одна над другой, на общем тороидальном сердечнике равна:

$$M = \frac{12,56 w_1 w_2 S_т}{l_{ср}},$$

где $S_т$ — сечение тороидального сердечника, *см*²;

$l_{ср}$ — средняя длина осевой линии сердечника, *см*.

Коэффициент связи между катушками определяется размерами катушек и расстоянием между ними и не зависит от числа витков и типа намотки. Коэффициент связи равен:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где $M$ — взаимная индуктивность;
$L_1$ и $L_2$ — индуктивности катушек.

Следует отметить, что величина $k$ всегда меньше единицы.

## Добротность катушек индуктивности

Качество катушки характеризуется отношением ее индуктивного сопротивления к активному при заданной частоте $\omega$ и индуктивности $L$. Это соотношение

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{X_L}{R}$$

называется добротностью катушки индуктивности.

Индуктивное сопротивление, оказываемое катушкой переменному току, можно рассчитать по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi f L,$$

где $X_L$ — индуктивное сопротивление, *ом*;
$f$ — частота, *гц*;
$L$ — индуктивность катушки, *гн*.

Для тока с частотой 50 *гц* эта формула имеет вид:

$$X_L = 314L,$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*.

Таблица 12

**Индуктивные сопротивления катушек на высокой частоте (в омах)**

| Индуктивность, *мкгн* | Частота | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 *Мгц* | 3 *Мгц* | 1,2 *Мгц* | 600 *кгц* | 200 *кгц* | 30 *кгц* |
| 25 | 1 570 | 470 | 190 | 95 | 31,4 | 4,7 |
| 50 | 3 140 | 940 | 380 | 190 | 62,8 | 9,4 |
| 100 | 6 300 | 1 890 | 760 | 380 | 125 | 18,9 |
| 200 | 12 560 | 3 770 | 1 500 | 760 | 250 | 38,0 |
| 500 | 31 400 | 9 400 | 3 800 | 1 900 | 628 | 94,0 |
| 1 000 | 63 000 | 18 900 | 7 600 | 3 800 | 1 260 | 189 |
| 5 000 | 314 000 | 94 000 | 38 000 | 19 000 | 6 280 | 940 |
| 25 000 | 1 570 000 | 470 000 | 189 000 | 94 200 | 31 400 | 4 700 |
| 100 000 | 6 300 000 | 1 890 000 | 756 000 | 378 000 | 126 000 | 18 900 |

В табл. 12 приведены значения индуктивных сопротивлений для различных величин индуктивностей как для низких, так и высоких частот. На рис. 40 показана номограмма для определения индуктивных сопротивлений катушек индуктивности.

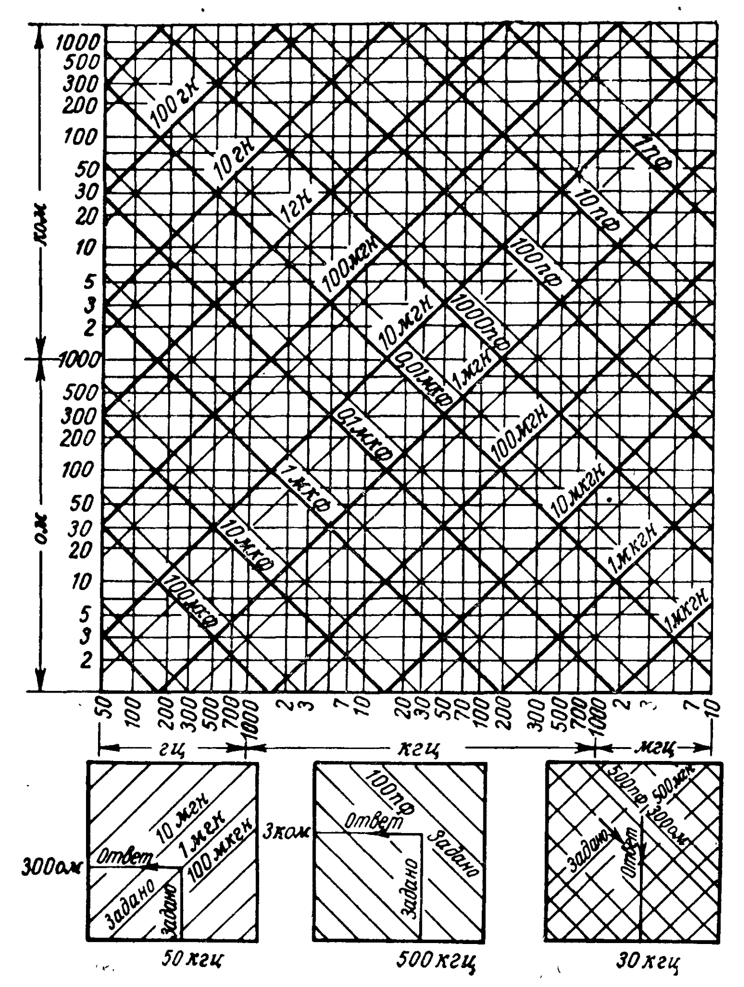



Рис. 40. Номограмма для расчета индуктивного сопротивления катушек.

Активное сопротивление катушки $R$ складывается из сопротивления провода токам высокой частоты, сопротивления вносимого диэлектрическими потерями в каркасе, сопротивления вносимого собственной емкостью катушки и др.

Таблица 12,а

**Индуктивные сопротивления катушек на низкой частоте (в омах)**

| Индуктивность, *гн* | Частота, *гц* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 250 | 1 000 | 2 500 | 5 000 | 10 000 |
| 0,1 | 31 | 157 | 682 | 1 570 | 3 140 | 6 280 |
| 0,25 | 78 | 390 | 1 570 | 9 900 | 7 850 | 15 700 |
| 1,0 | 314 | 1 570 | 6 280 | 15 700 | 31 400 | 62 800 |
| 5,0 | 1 570 | 7 850 | 31 400 | 78 500 | 157 000 | 314 000 |
| 25,0 | 7 850 | 39 000 | 157 000 | 390 000 | 785 000 | 1 510 000 |
| 100,0 | 31 400 | 157 000 | 638 000 | 1 570 000 | 3 140 000 | 6 280 000 |

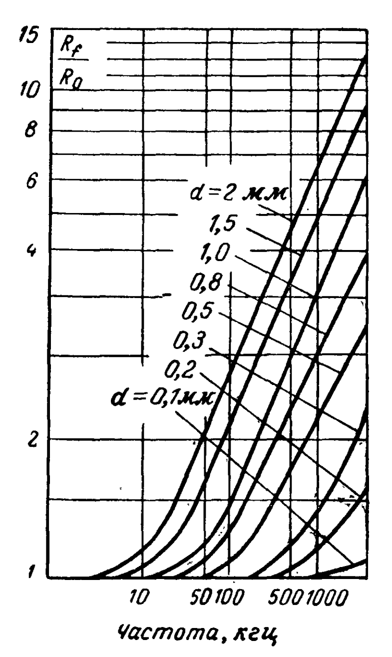



Рис. 41. График зависимости сопротивления медного провода от частоты.

Величина полного активного сопротивления катушки может колебаться в широких пределах. Для катушек средневолнового диапазона, имеющих индуктивность около 200 *мкгн*, полное активное сопротивление лежит в пределах от 3 до 50 *ом*. Длинноволновые катушки, имеющие индуктивность около 2 000 *мкгн*, обладают сопротивлением от 15 до 150 *ом*.

Переменное магнитное поле вызывает внутри проводника противо-э. д. с., приводящие к неравномерному распределению тока по поперечному сечению проводника. Кроме того, в проводнике возбуждаются вихревые токи и происходит потеря мощности. В результате этого ток по сечению проводника сосредоточивается главным образом в поверхностных слоях. Неравномерное распределение тока уменьшает действующее сечение проводника и тем самым увеличивает его сопротивление. Сопротивление провода току высокой частоты может быть в несколько раз выше его сопротивления постоянному току. На рис. 41 показана зависимость увеличения сопротивления медных проводов от частоты.

Сопротивление одного погонного сантиметра медного провода круглого сечения току высокой частоты равно:

$$R_f = 83,2 \frac{\sqrt{f}}{d} 10^{-6},$$

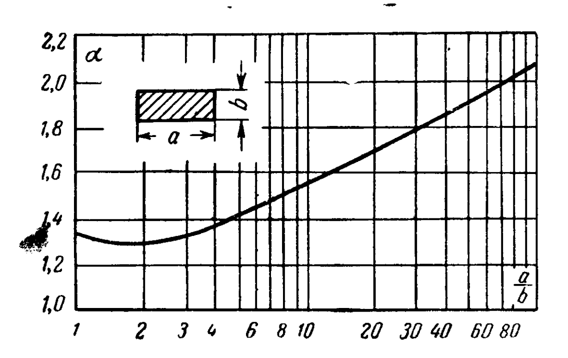



Рис. 42. График значений коэффициента α.

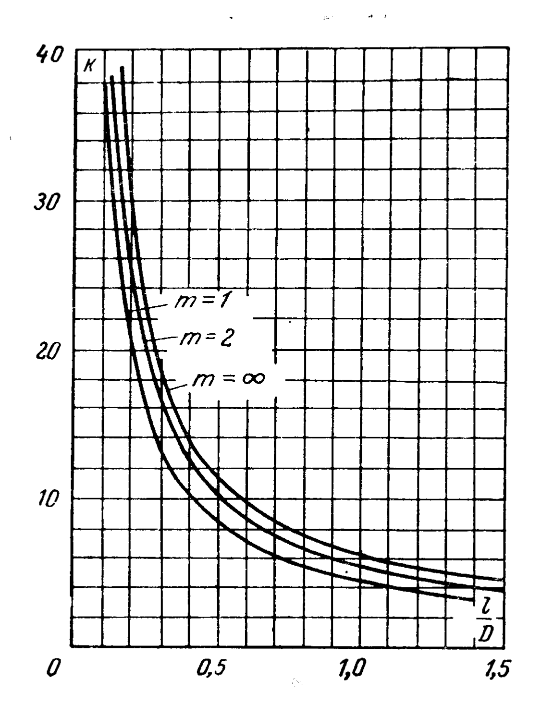



Рис. 43. График значений коэффициента $k$ для расчета сопротивления однослойных и тонких многослойных катушек ($m$ — число слоев).

где $f$ — частота, *Мгц*;

$d$ — диаметр провода, *см*.

Сопротивление провода прямоугольного сечения

$$R_f = \frac{1,3\alpha\sqrt{f}}{a+b}10^{-4},$$

где $f$ — частота, *Мгц*;

$\alpha$ — поправочный коэффициент, значения которого приведены на рис. 42;

$a$ и $b$ — размеры сечения провода, *см*.

Сопротивление провода катушки току высокой частоты как при однослойной, так и при многослойной намотках при частотах до 10 *Мгц* равно:

$$R_f = R_0\left[F + \left(\frac{kwd}{2D}\right)^2 G\right],$$

где $R_0$ — сопротивление провода постоянному току, *ом*;

$d$ — диаметр провода без изоляции, *см*;

$w$ — число витков катушки;

$D$ — диаметр однослойной катушки или наружный диаметр многослойной катушки, *см*;

$k$ — поправочный коэффициент.

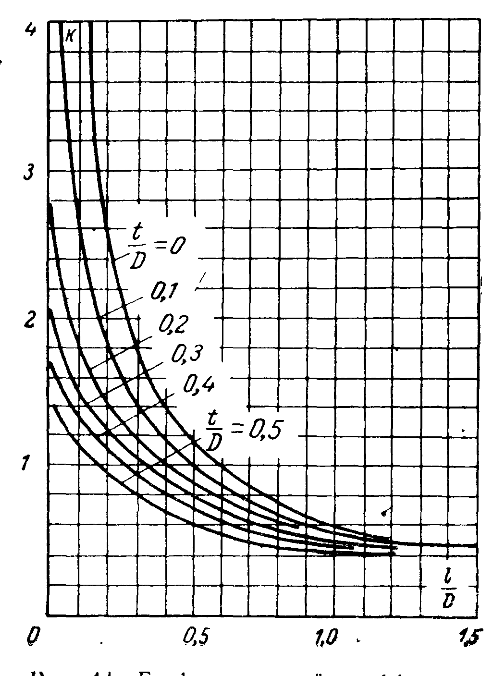



Рис. 44. График значений коэффициента $k$ для расчета сопротивления многослойных катушек.

Значения коэффициента $k$ для однослойных и тонких многослойных с небольшим числом витков катушек показаны на рис. 43, а для обычных многослойных — на рис. 44.

Коэффициент $F$ определяет сопротивление с учетом поверхностного эффекта, а коэффициент $G$ учитывает потери на вихревые токи. При увеличении диаметр провода его сопротивление токам высокой частоты из-за поверхностного эффекта будет уменьшаться, а из-за вихревых токов будет возрастать весьма значительно. При уменьшении диаметра провода произойдет обратное явление. Таким образом, существует некоторый диаметр провода на заданной частоте, называемый оптимальным, при котором $F$ и $G$ минимальны. Значения коэффициентов $F$ и $G$ для медного провода опти-

мального диаметра определяются по табл. 13 при помощи параметра

$$z = 0,106d\sqrt{f},$$

где $d$ — диаметр провода, *см*;
$f$ — частота, *гц*.

Таблица 13

**Значения коэффициентов $F$ и $G$**

| z | F | G | z | F | G |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 1,000 | — | 5,0 | 2,049 | 0,7550 |
| 0,5 | 1,000 | 0,00097 | 6,0 | 2,394 | 0,9316 |
| 0,8 | 1,002 | 0,00632 | 7,0 | 2,743 | 1,109 |
| 1,0 | 1,005 | 0,01519 | 8,0 | 3,094 | 1,287 |
| 1,3 | 1,015 | 0,0413 | 9,0 | 3,446 | 1,464 |
| 1,5 | 1,026 | 0,0681 | 10,0 | 3,799 | 1,641 |
| 1,8 | 1,052 | 0,1265 | 15,0 | 5,562 | 2,525 |
| 2,0 | 1,078 | 0,1724 | 20,0 | 7,328 | 3,409 |
| 2,3 | 1,131 | 0,2462 | 25,0 | 9,094 | 4,317 |
| 2,5 | 1,175 | 0,2949 | 30,0 | 10,86 | 5,177 |
| 2,8 | 1,256 | 0,3632 | 40,0 | 14,40 | 6,946 |
| 3,0 | 1,318 | 0,4049 | 50,0 | 17,93 | 8,173 |
| 3,5 | 1,442 | 0,4987 | 70,0 | 25,00 | 12,25 |
| 4,0 | 1,678 | 0,5842 | 90,0 | 32,07 | 15,78 |
| 4,5 | 1,863 | 0,6687 | 100,0 | 35,61 | 17,75 |

Расчет сопротивления катушек КВ и УКВ, намотанных с шагом, производится по формуле

$$R_f = \frac{0,525Dw\sqrt{f}}{d} 10^{-3},$$

где $R_f$ — сопротивление катушки, *ом*;
$D$ — диаметр катушки, *см*;
$d$ — диаметр провода, *см*;
$f$ — частота, *Мгц*.

Сопротивление току высокой частоты катушек, намотанных литцендратом, равно:

$$R_f = R_0 \left\{F + \left[\frac{c}{d_0^2} + \left(\frac{kw}{2D}\right)^2\right] nd^2G\right\},$$

где $R_0$ — сопротивление катушки постоянному току, *ом*;
$d$ — диаметр отдельной жилы, *см*;
$n$ — число жил;
$d_0$ — полный наружный диаметр литцендрата, *см*;
$c$ — коэффициент, зависящий от числа жил, значения которого приведены в табл. 14.

Ориентировочно полный диаметр литцендрата рассчитывается по формуле

$$d_0 \approx 1,35d\sqrt{n}.$$

Как видно из приведенных формул, совместное действие эффекта вихревых токов и поверхностного эффекта приводит к значитель-

Таблица 14

Значения коэффициента $c$

| $n$ | 3,0 | 7,0 | 9,0 | 15 | 19 | 27 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $c$ | 1,55 | 1,817 | 1,84 | 1,88 | 1,90 | 1,92 | 2,0 |

ному увеличению активного сопротивления катушек. При совместном действии этих двух эффектов изменение сопротивления катушки в значительной мере подчиняется закону $\sqrt{f}$, так что сопротивление катушки $R_{f1}$ при частоте $f_1$ относится к ее сопротивлению $R_{f2}$ при частоте $f_2$ как

$$\frac{R_{f1}}{R_{f2}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}.$$

Добротность катушек индуктивности, определяемая совокупным действием ее индуктивности, активного сопротивления и собственной емкости, не будет линейно зависеть от частоты. Как правило, у всех катушек наблюдается при определенных частотах максимальное значение добротности, которое зависит от конструкции катушки.

Для повышения добротности катушек большое значение имеет выбор оптимального соотношения размеров. Для однослойных катушек рекомендуется выбирать отношение длины намотки к диаметру в пределах 0,7—1,0.

Для многослойных катушек рекомендуются следующие соотношения размеров:

$$\frac{l}{D} = 0,2 \div 0,5; \quad \frac{t}{D} = 0,5 \div 1,0.$$

Добротность катушек может быть повышена при использовании для их намотки литцендрата. В многожильном проводе уменьшаются потери на вихревые токи и на поверхностный эффект. Применение литцендрата оправдывается до частот 1—1,5 *Мгц*.

## Коротковолновые катушки

Коротковолновые катушки, как правило, выполняются однослойными и наматываются медным проводом.

Сопротивление этих катушек переменному току равно:

$$R_f = \frac{Dw\sqrt{f}}{380}\left(1 - \frac{w^2 d^2}{50 l^2}\right),$$

где $D$ — диаметр намотки, *см*;
$w$ — число витков;
$f$ — частота, *Мгц*;
$d$ — диаметр провода, *мм*;
$l$ — длина намотки, *см*.

Если катушка используется при частотах, близких к собственной частоте катушки, то следует вносить поправку в действующее сопротивление обмотки

$$R_{f1} = \frac{R_f}{\left(1 - \frac{fLC_0}{25\,300}\right)^2},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

$C_0$ — собственная емкость катушки, *пф*.

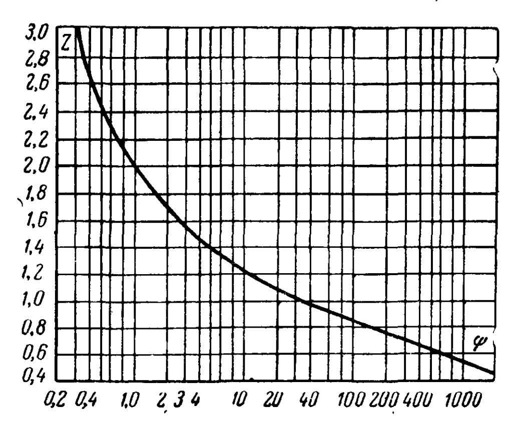



Рис. 45. График зависимости $z_{опт}$ от коэффициента $\psi$.

Индуктивность катушки при заданных размерах и числе витков

$$L = \frac{Dw^2}{102p + 45},$$

где $p$ — отношение длины намотки к диаметру катушки.

Сопротивление катушки при заданной форме намотки и индуктивности равно:

$$R_f = \frac{\sqrt{f}}{380d}\left[\sqrt{LD(102p + 45)} + \frac{d^2\sqrt{L(102p + 45)^3}}{50p^2\sqrt{D^5}}\right].$$

Расчет оптимального диаметра провода сводится к определению вспомогательного коэффициента

$$\psi = \left(\frac{kw}{2z'D}\right)^2,$$

где $k$—коэффициент, определяемый по графикам на рис. 43;

$$z' = 0{,}106\sqrt{f}.$$

При помощи коэффициента $\psi$ по графику на рис. 45 находят величину $z_{\text{опт}}$. Диаметр провода находится по формуле

$$d_{\text{опт}} = \frac{z_{\text{опт}}}{z'}.$$

При $\psi > 2\,000$

$$z_{\text{опт}} = \frac{2}{\sqrt[6]{2\psi}},$$

а при $\psi < 0{,}3$

$$z_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2}{\psi}} + 0{,}71.$$

Полученное значение оптимального диаметра округляется до ближайшего стандартного.

Оптимальный диаметр провода катушек, намотанных с шагом, зависит от шага намотки и размеров катушки. В случае круглого провода

$$d_{\text{опт}} = \frac{\tau}{k_1},$$

где $\tau$ — шаг намотки;

$k_1$ — коэффициент, значения которого приведены на рис. 46.

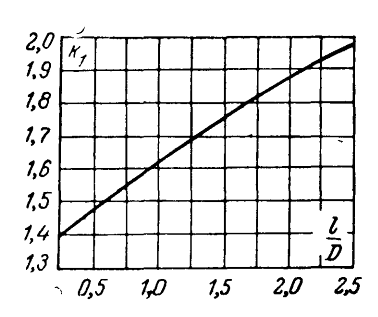



Рис. 46. График значений коэффициента $k_1$.

Рис. 47. График значений коэффициента $k_2$.

Сопротивление и добротность катушки, намотанной таким проводом, будут равны:

$$R_f = \frac{7{,}4w^2\sqrt{f}}{p} \cdot 10^{-4};$$

$$Q = 8{,}5DL_0p\sqrt{f}.$$

В случае плоского провода (ленты)

$$a_{\text{опт}} = \frac{\tau}{k_2},$$

где $a_{\text{опт}}$ — оптимальная ширина ленты;

$k_2$ — коэффициент, значения которого приведены на рис. 47.

Сопротивление катушки из такой ленты равно:

$$R_f = \frac{0,5w^2 \sqrt{f\rho}}{p},$$

а ее добротность

$$Q = 12,6DL_0 p \sqrt{\frac{f}{\rho}} 10^{-3},$$

где $\rho$ — удельное электросопротивление материала ленты.

Добротность катушки для любого диаметра провода равна:

$$Q = \frac{2\,400 \sqrt{f}\, Lp^2 dD}{w\left(l^2 + \frac{w^2 d^2}{50}\right)}.$$

Если, задавшись величиной индуктивности, формой намотки и диаметром провода, подбирать размеры катушки, то оптимальным диаметром обмотки явится:

$$D_{опт} = \sqrt{\frac{Ld\,(102p + 45)}{10p^2}}.$$

Следует отметить, что при расчете по вышеприведенным формулам не учитываются потери в изоляции провода, материале каркаса и др. Поэтому фактические значения сопротивления и добротности отличаются от расчетных. Сопротивление катушки на высокой частоте больше расчетного, а добротность соответственно меньше.

## Катушки с магнитными сердечниками

Магнитные сердечники, введенные в катушку, увеличивают ее индуктивность. Кроме того, катушки с сердечниками имеют меньшее число витков при заданной индуктивности, большую добротность и незначительные размеры. Катушка с сердечником обладает более сосредоточнным магнитным полем, благодаря чему уменьшается магнитная связь между контурами в различных каскадах. Преимуществом таких катушек является возможность подстройки индуктивности путем перемещения сердечника внутри катушки. Магнитные сердечники для катушек изготовляют из магнитодиэлектриков и из ферритов.

Магнитодиэлектрики изготовляют из размельченного вещества, содержащего железо, отдельные частицы которого механически связаны между собой каким-либо диэлектриком. Диэлектрик осуществляет изоляцию частиц друг от друга и придает форму сердечнику. Наиболее известны магнитодиэлектрики из альсифера и карбонильного железа.

Альсифер отличается хорошими электрическими и магнитными показателями. Магнитодиэлектрики на основе альсифера имеют отрицательный температурный коэффициент магнитной проницаемости, что позволяет компенсировать положительный температурный коэффициент индуктивности катушек. Для применения на длинных волнах предназначен альсифер РЧ-9, на средних и коротких волнах — РЧ-6.

Карбонильное железо получается прессованием порошкообразного карбонильного железа с бакелитом, стиролом или аминопластом. Сердечники из карбонильного железа применяются на частотах до 30—50 *Мгц*. Карбонильное железо Р-2 предназначено для использования в катушках УКВ, а Р-8 — в катушках длинных и средних волн.

Ферриты представляют собой полупроводниковую керамику, получаемую путем прессования и обжига смеси из солей и окислов, в состав которых входит никель, марганец, литий, медь и др. Ферриты обладают высокой магнитной проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением, что обеспечивает малые потери на вихревые токи даже на очень высоких частотах.

На радиочастотах наиболее употребительны никель-цинковые (НЦ), марганцево-цинковые (МЦ), литий-цинковые (ЛЦ) и медно-цинковые (МЦ) ферриты. Марганцево-цинковые ферриты используются в основном на частотах до 100 *кгц*. Медно-цинковые и литий-цинковые ферриты обладают невысокой магнитной проницаемостью (100—200) и используются в основном на коротких волнах. Свинцово-никелевые ферриты применяются на КВ и УКВ, причем на КВ с проницаемостью 50—200, а на УКВ — с проницаемостью 5—25.

Свойства высокочастотных магнитных материалов характеризуются эффективной магнитной проницаемостью, диапазоном рабочих частот, потерями и стабильностью.

Эффективную магнитную проницаемость определяют, измеряя индуктивность катушки с сердечником $L_c$ и без него $L_0$, с последующим вычислением по формуле

$$\mu_{эфф} = \frac{L_c}{L_0}.$$

Для сердечников простых конфигураций, например цилиндрических, величина $\mu_{эфф}$ может быть рассчитана, а для более сложных конфигураций определяется только опытным путем.

Магнитный сердечник увеличивает полное сопротивление катушки, причем это увеличение происходит из-за потерь на гистерезис, вихревых токов, высокочастотных потерь в диэлектрике. Потери на гистерезис зависят от напряженности магнитного поля $H$, а потери на вихревые токи и в диэлектрике — от частоты. Общее сопротивление потерь $R_c$ определяется по тангенсу угла

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{R_c}{\omega L},$$

измеренному на катушке с тороидальным сердечником. Величина, обратная $\operatorname{tg} \delta_c$, называется добротностью сердечника, т. е.

$$Q_c = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_c}.$$

Диэлектрические потери в ферритах не поддаются точному расчету, но они оказывают влияние на общие потери. Так, для ферритов 600НН и 100НН величина $\operatorname{tg} \delta_д$ на частоте 0,5 *Мгц* составляет 0,35 и 0,31 соответственно. С повышением частоты диэлектрические потери уменьшаются.

Стабильность магнитных материалов характеризуется изменением проницаемости и потерь под влиянием температуры, влажности, а также изменением с течением времени. Под влиянием температуры

изменяется главным образом магнитная проницаемость. Температурную стабильность магнитных материалов принято характеризовать температурным коэффициентом магнитной проницаемости

$$ТК\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu \Delta t^{\circ}},$$

где $\Delta\mu$ — изменение магнитной проницаемости при изменении температуры на $\Delta t^{\circ}$.

## Катушки индуктивности с цилиндрическими магнитными сердечниками

К этому типу катушек относятся высокочастотные дроссели, катушки магнитных антенн, катушки фильтров промежуточной частоты и некоторые разновидности контурных катушек. Сердечники катушек изготовляют из карбонильного железа или феррита.

Сердечники из карбонильного железа (рис. 48) обозначаются СЦР (сердечники цилиндрические с резьбой), СЦГ (сердечники цилиндрические гладкие) и СЦТ (сердечники цилиндрические трубчатые). Основные данные цилиндрических карбонильных сердечников приведены в табл. 15.

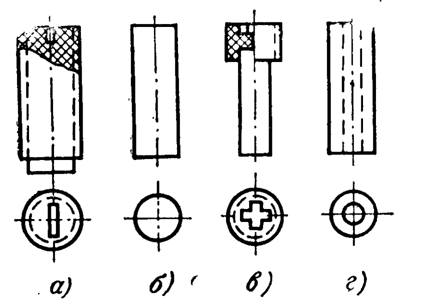



Рис. 48. Карбонильные цилиндрические сердечники.

*а* — СЦР; *б* и *в* — СЦГ; *г* — СЦТ.

Стержневые ферритовые сердечники изготовляются из материала марки 1000НН и 600НН следующих типоразмеров: СС1,2×10; СС1,8×12; СС3,5×20; СС3,5×30. Первое число в обозначении типоразмера указывает диаметр, а второе — длину сердечника в миллиметрах.

Для расчета дросселей с цилиндрическими сердечниками из феррита необходимо знать эффективную проницаемость $\mu_{эфф}$. На рис. 49 показаны кривые зависимости эффективной проницаемости от отношения длины сердечника к его диаметру. Зная эффективную проницаемость и полагая, что однослойная обмотка полностью покрывает сердечник, число витков обмотки рассчитывают по формуле

$$w = \sqrt{\frac{L_{др}}{k' D_{к} \mu_{эфф}}},$$

где $L_{др}$ — требуемая индуктивность дросселя, *мкгн*;

$D_{к}$ — диаметр обмотки, *см*.

Коэффициент $k'$ определяется из графика на рис. 50, где $l_{к}$ и $D_{к}$ — длина и диаметр обмотки.

Цилиндрические ферритовые сердечники широко применяются в качестве антенн для радиоприемных устройств. Эффективная магнитная проницаемость антенных стержней лежит в пределах от 2 000

Таблица 15

**Основные данные цилиндрических карбонильных сердечников**

| Тип сердечника | Размеры, мм | | Среднее значение эффективной магнитной проницаемости сердечника, $\mu_c$ | | Среднее значение добротности катушек | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | D | l | Класса А | Класса Б | Класса А | Класса Б |
| СЦР-1 | 1М6 | 10 | 1,50 | 1,70 | 130 | 90 |
| СЦР-2 | 1М6 | 19 | 1,65 | 1,95 | 135 | 92 |
| СЦР-3 | 1М7 | 10 | 1,60 | 1,70 | 130 | 100 |
| СЦР-4 | 1М7 | 19 | 1,75 | 1,95 | 140 | 97 |
| СЦР-5 | 1М8 | 10 | 1,60 | 1,70 | 130 | 105 |
| СЦР-6 | 1М8 | 19 | 1,80 | 1,90 | 145 | 105 |
| СЦР-7 | 1М9 | 10 | 1,50 | 1,65 | 140 | 105 |
| СЦР-8 | 1М9 | 19 | 1,75 | 1,85 | 145 | 110 |
| СЦГ-1 | 9,3 | 10 | 2,10 | 2,10 | 160 | 130 |
| СЦГ-2 | 9,3 | 19 | 2,45 | 2,35 | 185 | 137 |
| СЦТ-1 | 9,3 | 10 | 2,00 | 2,00 | 160 | 130 |
| СЦТ-2 | 9,3 | 19 | 2,35 | 2,20 | 180 | 137 |

до 20. Основным параметром, определяющим качество антенны, которым необходимо руководствоваться при выборе марки феррита, является тангенс угла потерь материала сердечника в заданной

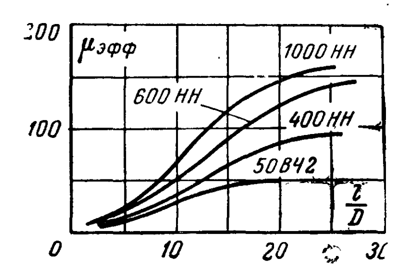



Рис. 49. График зависимости эффективной магнитной проницаемости от отношения $l/D$ для сердечников из ферритов с различной магнитной проницаемостью.

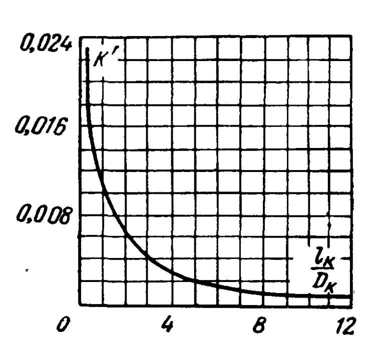



Рис. 50. График зависимости коэффициента $k$ от соотношения $l_к/D_к$.

области частот. Основные параметры антенных стержней при диаметре 8 и длине 160 *мм* из марганцево-цинковых и никель-цинковых ферритов приведены в табл. 16.

Наиболее широкое применение получили следующие размеры ферритовых сердечников для антенн радиоприемной аппаратуры.

| Сечение стержней | Длина $l$, *мм* |
|---|---|
| Круглое $D = 8$ *мм* | 60, 65, 80, 100, 125, 140, 160 |
| Круглое $D = 10$ *мм* | 200 |
| Прямоугольное $16\times4$ *мм* | 80, 100, 125 |
| Прямоугольное $20\times3$ *мм* | 115, 125 |
| Прямоугольное $25\times5$ *мм* | 160, 200 |

Таблица 16

**Основные параметры антенных стержней для различных диапазонов длин волн**

| Диапазон частот радиовещательного приемника | Частота $f$, *Мгц* | | Длина волны, *м* | | Марка феррита | $\mu_{эфф}$ | $tg\,\delta\cdot10^{-3}$ | $L$, *мкгн* | $Q$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | минимальная | максимальная | максимальная | минимальная | | | при $f_{макс}$ | | |
| СДВ | 0,01 | 0,15 | 30 000 | 2 000 | 2000НМ1 | 100 | 2 | — | — |
| ДВ | 0,15 | 0,408 | 2 000 | 735 | 2000НМ1 | 100 | 5 | 4 100 | 120 |
| СВ | 0,52 | 1,6 | 575 | 187 | 700НМ | 140 | 4 | 370 | 120 |
| КВ | 4,0 | 12,0 | 75 | 25 | 150ВЧ | 80 | 8 | 5,5 | 100 |
| КВ | 6,0 | 18,0 | 50 | 17 | 100ВЧ | 65 | 6 | 2,2 | 140 |
| КВ | 9,0 | 27,0 | 33 | 11 | 50ВЧ2 | 40 | 4 | 0,8 | 180 |
| УКВ | 66 | 73 | 4,55 | 4,1 | 30ВЧ2 | 30 | 25 | 0,15 | 160 |

При конструировании катушек индуктивности с цилиндрическими сердечниками следует иметь в виду, что произведение $\mu_{эфф}Q = \text{const}$ в рабочем диапазоне частот. Это обстоятельство позволяет, изменяя соотношение $l/D$, добиться необходимого значения добротности катушки.

## Катушки индуктивности с кольцевыми сердечниками

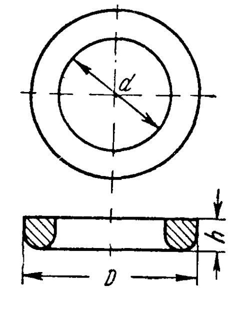



Рис. 51. Тороидальный сердечник из альсифера.

Наиболее полное использование магнитных свойств материала сердечника дает кольцевой (тороидальный) сердечник. Катушки индуктивности с кольцевыми сердечниками применяются в тех случаях, когда требуется максимальная индуктивность при минимальных размерах катушки. Достоинством тороидальных катушек является большая добротность и практически полное отсутствие внешнего поля рассеяние. Последнее устраняет необходимость экранирования катушек. Достоинством также является возможность получения сильной связи между обмотками, расположенными на одном сердечнике, а недостатком — сложность намотки и невозможность плавной регулировки индуктивности. Тороидальные сердечники выполняются из ферритов и альсиферов.

Сердечники из альсифера применяются на частотах до 1—1,5 *Мгц*. На более высоких частотах добротность катушек с альси-

Таблица 17

**Размеры альсиферовых кольцевых сердечников**

| Наружный диаметр $D$, *мм* | Внутренний диаметр $d$, *мм* | Высота $h$, *мм* | Площадь сечения сердечника $S_c$, *см²* |
|---|---|---|---|
| 15 | 7 | 4,8 | 0,175 |
| 15 | 7 | 6,8 | 0,250 |
| 19 | 11 | 4,8 | 0,175 |
| 19 | 11 | 6,7 | 0,250 |
| 24 | 13 | 5,2 | 0,250 |
| 24 | 13 | 7,0 | 0,350 |
| 36 | 25 | 7,5 | 0,380 |
| 36 | 25 | 9,7 | 0,500 |
| 44 | 28 | 7,2 | 0,500 |
| 44 | 28 | 10,3 | 0,750 |
| 55 | 32 | 8,2 | 0,800 |
| 55 | 32 | 9,7 | 1,00 |
| 55 | 32 | 11,7 | 1,20 |
| 64 | 40 | 9,7 | 1,00 |
| 64 | 40 | 14,0 | 1,50 |
| 75 | 46 | 12,0 | 1,50 |
| 75 | 46 | 16,8 | 2,20 |

феровыми сердечниками ниже, чем с сердечниками из карбонильного железа. Размеры тороидальных сердечников из альсифера (рис. 51) приведены в табл. 17. Основные параметры сердечников приведены в табл. 18. Буквы в обозначении марки альсифера означают: ТЧ — тональная частота, ВЧ — высокая частота, К — компенсированный температурный коэффициент магнитной проницаемости. Наряду с двумя цветными полосами в маркировке альсиферового сердечника существует знак в виде одной полосы. Альсиферовые сердечники с одной маркировочной полосой применяются для изготовления катушек фильтров, которые используются в аппаратуре проводной связи.

Таблица 18

**Основные параметры альсиферов**

| Тип сердечника | Начальная магнитная проницаемость $\mu_0$ | Максимальная рабочая частота, *кгц* | Коэффициент потерь на гистерезис $\delta_г$ | Маркировочный знак |
|---|---|---|---|---|
| ТЧ-60 | 55—60 | 10 | $6 \cdot 10^{-5}$ | Две черные полосы |
| ТЧК-55 | 50—60 | 10 | $6 \cdot 10^{-5}$ | „ красные „ |
| ВЧ-32 | 30—34 | 50 | $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ | „ белые „ |
| ВЧ-22 | 20—24 | 100 | $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ | „ зеленые „ |
| ВЧК-22 | 20—24 | 100 | $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ | „ желтые „ |

Число витков катушек индуктивности с тороидальными сердечниками из альсифера определяется по формуле

$$w = A\sqrt{L},$$

где $A$ — коэффициент, значения которого приведены в табл. 19;
$L$ — заданная индуктивность, *мгн*.

Таблица 19

**Значения коэффициента** $A$

| ТЧ-60 | ТЧК-55 | ВЧ-32 | ВЧК-22 | Диаметр, *мм* | | Диаметр провода с изоляцией, *мм* | Средняя длина витка, *см* | Сечение, *см²* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент $A$ | | | | наружный | внутренний | | | |
| 104 | 109 | 142 | 172 | 64 | 40 | $\frac{28}{\sqrt{w}}$ | 8,28 | 2,0 |
| 93 | 97 | 126 | 154 | 64 | 40 | | 9,2 | 2,5 |
| 85 | 89 | 116 | 140 | 64 | 40 | $\frac{18}{\sqrt{w}}$ | 9,9 | 3,0 |
| 107 | 111 | 1 6 | 176 | 55 | 32 | | 7,26 | 1,6 |
| 95 | 100 | 130 | 157 | 55 | 32 | $\frac{16}{\sqrt{w}}$ | 7,58 | 2,0 |
| 87 | 91 | 119 | 143 | 55 | 32 | | 8,26 | 2,4 |
| 123 | 128 | 168 | 202 | 44 | 28 | | 6,00 | 1,0 |
| 110 | 114 | 150 | 181 | 44 | 28 | | 6,66 | 1,25 |
| 100 | 99 | 137 | 165 | 44 | 28 | $\frac{13}{\sqrt{w}}$ | 7,16 | 1,5 |
| 133 | 139 | 182 | 220 | 36 | 25 | | 5,30 | 0,72 |
| 129 | 135 | 177 | 214 | 36 | 25 | $\frac{7}{\sqrt{w}}$ | 5,50 | 0,76 |
| 113 | 118 | 154 | 186 | 36 | 25 | | 6,38 | 1,0 |
| 124 | 130 | 170 | 205 | 24 | 13 | $\frac{5{,}5}{\sqrt{w}}$ | 3,55 | 0,5 |
| 104 | 108 | 142 | 171 | 24 | 13 | | 4,27 | 0,72 |
| 134 | 140 | 183 | 221 | 19 | 11 | | 3,0 | 0,54 |
| 112 | 117 | 154 | 185 | 19 | 11 | | 3,8 | 0,72 |

Исходя из средней длины витка $l_{ср}$ для данного типоразмера сердечника, приведенной в табл. 19, можно определить длину обмоточного провода $l_{пр} = l_{ср}w$.

Длину провода необходимо находить исходя из того, что намотка подобных катушек производится специальным челноком, на который предварительно наматывается провод. Диаметр провода определяется по формулам, приведенным в табл. 19.

Тородиальные сердечники из феррита подразделяются на четыре основных типа, характеризующихся различным отношением наружного диаметра $D$ к внутреннему $d$. Наименование тороидальных сердечников составляется из буквы К и трех цифр, обозначающих соответственно наружный диаметр, внутренний диаметр и высоту сердечника; все линейные размеры выражаются в миллиметрах. Наиболее распространенные типоразмеры ферритовых тороидальных сердечников приведены в табл. 20.

Таблица 20

## Размеры тороидальных сердечников

| $D/d$ | Типоразмер | $l_{ср}$, *см* | $S_с$, *см²* | $S_0$, *см²* |
|---|---|---|---|---|
| 2,5 | К2,5×1×0,8 | 0,55 | 0,06 | 0,0785 |
| | К2,5×1×1,2 | | 0,09 | |
| | К4,0×1,6×1,2 | 0,88 | 0,0144 | 0,0201 |
| | К4,0×1,6×1,8 | | 0,0216 | |
| | К6×2,5×1,8 | 1,33 | 0,0315 | 0,0491 |
| | К6×2,5×2,8 | | 0,049 | |
| | К10×4×3 | 2,2 | 0,09 | 0,0126 |
| | К10×4×4,5 | | 0,135 | |
| | К15×6×4,5 | 3,3 | 0,203 | 0,283 |
| | К15×6×7 | | 0,315 | |
| 2 | К1,2×0,6×0,4 | 0,27 | 0,0012 | 0,00283 |
| | К2×1×0,5 | 0,47 | 0,0025 | 0,00785 |
| | К3,2×1,6×0,8 | 0,75 | 0,0064 | 0,0201 |
| | К5×2,5×1,2 | 1,18 | 0,015 | 0,0491 |
| | К8×4×2 | 1,85 | 0,04 | 0,0126 |
| | К12×6×3 | 2,82 | 0,09 | 0,283 |
| | К20×10×5 | 4,71 | 0,25 | 0,785 |
| | К32×16×8 | 7,55 | 0,64 | 2,01 |
| | К50×25×6 | 11,8 | 0,75 | 4,91 |
| | К50×25×9 | 11,8 | 1,13 | 4,91 |
| 1,6 | К1×0,6×0,3 | 0,25 | 0,0006 | 0,00283 |
| | К1,6×1×0,3 | 0,40 | 0,0009 | 0,00785 |
| | К2,5×1,6×0,5 | 0,64 | 0,0022 | 0,0201 |
| | К4×2,5×0,8 | 1,02 | 0,0060 | 0,0314 |
| | К7×4×1,5 | 1,75 | 0,0225 | 0,126 |
| | К10×6×2 | 2,51 | 0,04 | 0,283 |
| | К16×10×3 | 4,09 | 0,09 | 0,785 |
| | К28×16×6 | 6,92 | 0,36 | 2,01 |
| | К40×25×7,5 | 10,2 | 0,563 | 4,91 |
| | К65×40×6 | 16,5 | 0,7 | 12,6 |
| | К100×60×10 | 25,1 | 2,0 | 28,3 |
| 1,4 | К1,4×1×0,4 | 0,379 | 0,0008 | 0,00785 |
| | К2,2×1,6×0,8 | 0,60 | 0,0018 | 0,0201 |
| | К3,5×2,5×1 | 0,943 | 0,005 | 0,0491 |
| | К5,5×4×1,5 | 1,49 | 0,0113 | 0,126 |

Индуктивность тородиальной катушки с сердечником любого сечения вычисляется по формуле

$$L = \frac{1,26\mu_c w^2 S_c}{l_{ср}} 10^{-3},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

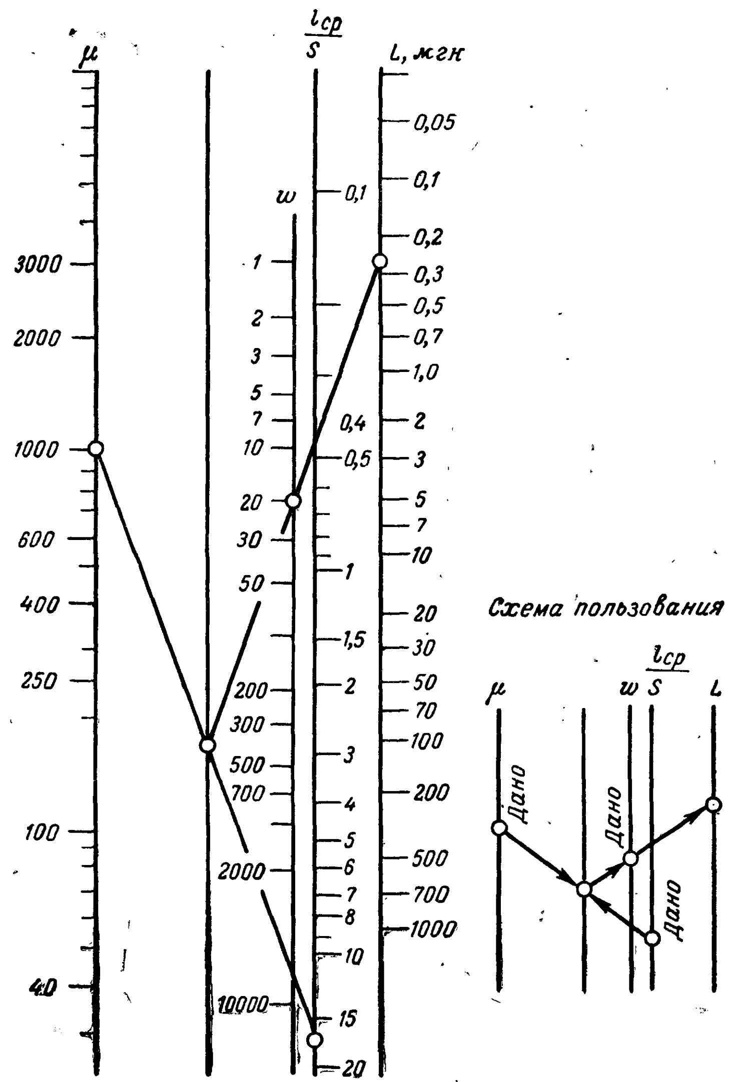



Рис. 52. Номограмма для расчета индуктивности катушек с тороидальными сердечниками.

$w$ — число витков катушки;
$l_{ср}$ — длина средней магнитной линии, *см*;
$S_с$ — площадь сечения магнитопровода, *см*²;
$\mu_с$ — магнитная проницаемость сердечника.

Средняя длина магнитной линии определяется по формуле

$$l_{ср} = \pi \left(\frac{D+d}{2}\right).$$

Площадь сечения магнитопровода равна:
для тора круглого сечения

$$S_с = 0{,}25\pi d^2,$$

где $d$ — диаметр сечения магнитопровода, *см*;
для тора прямоугольного сечения

$$S_с = bh,$$

где $b$ — ширина сечения магнитопровода, *см*;
$h$ — высота тора, *см*;
для тора прямоугольного сечения со скругленными краями

$$S_с = bh - 0{,}86r^2,$$

где $r$ — радиус скругления, *см*.

Для быстрого определения величины индуктивности тороидальных катушек можно воспользоваться номограммой, представленной на рис. 52.

### Катушки индуктивности с броневыми сердечниками

Броневые сердечники нашли широкое применение в резонансных контурах и фильтрах радиоэлектронной аппаратуры. Броневые сердечники изготовляют из карбонильного железа или из феррита. Сердечники могут быть с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью (рис. 53).

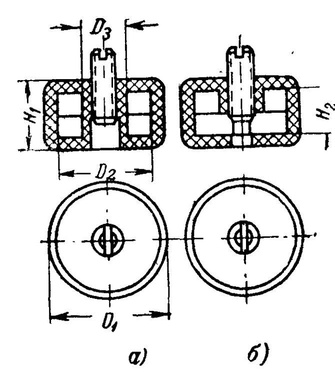



Рис. 53. Броневые сердечники.
*а* — с замкнутой магнитной цепью (СБа); *б* — с разомкнутой магнитной цепью (СБб).

Броневые сердечники с замкнутой магнитной цепью (СБа) позволяют изготовлять катушку меньших размеров, чем катушка той же индуктивности, но без сердечника. Сердечники с разомкнутой магнитной цепью (СБб) обеспечивают большие добротности и могут работать на более высоких частотах.

Броневые сердечники обладают слабым внешним полем, что ослабляет паразитные связи и позволяет приближать экраны к самому сердечнику. Для подстройки индуктивности броневые корпуса сердечников снабжены цилиндрическими подстроечными сердечниками, перемещение которых изменяет индуктивность на 20—

30%. Это понижает требования к точности изготовления намотки. Броневые сердечники из карбонильного железа обозначаются СБ, а из ферритов — Б и ОБ.

Броневые сердечники из карбонильного железа типа СБ в зависимости от их размеров делятся на шесть наиболее распространенных видов: СБ-9а, СБ-12а, СБ-23-11а, СБ-23-17а, СБ-28а и СБ-34а. Размеры этих сердечников и их основные данные приведены в табл. 21.

Таблица 21

**Основные данные броневых сердечников из карбонильного железа**

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | СБ-9а | СБ-12а | СБ-18а | СБ-21-11а | СБ-23-17а | СБ-28а | СБ-34а |
| $D_1$ | 9,6 | 12,3 | 18 | 23 | 23 | 28 | 34 |
| $D_2$ | 7,5 | 10 | 14 | 18,5 | 18 | 23 | 27 |
| $D_3$ | 4,6 | 6 | 9 | 11 | 11 | 13 | 13,5 |
| $H_1$ | 7,6 | 11 | 14,8 | 11,4 | 17,4 | 23,4 | 28,4 |
| $H_2$ | 4,2 | 8,2 | 10,4 | 6,2 | 12 | 17 | 20,4 |
| Подстроечник | М3×8 | М4×11,5 | М5×13,5 | 1М7×13 | 1М7×19 | 1М8×13 | 1М8×30 |
| $\mu_0$ | 3 | 4,5 | — | 3,7 | 4,6 | 4,7 | 4,5 |

Число витков катушек с броневыми сердечниками типа СБ можно определить по формуле

$$w = n\sqrt{L},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *мкгн*;

$n$ — постоянная, определяемая размерами сердечника и свойствами магнитного материала.

Для некоторых видов сердечников значения величины $n$ указаны в табл. 22.

Таблица 22

**Значения коэффициента $n$**

| Тип сердечника | $n$ | Тип сердечника | $n$ |
|---|---|---|---|
| СБ-9а | 7,05 | СБ-23-17а | 4,5 |
| СБ-12а | 6,7 | СБ-28а | 4,3 |
| СБ-23-11а | 4,0 | СБ-34а | 4,4 |

В табл. 23 указаны максимальные значения индуктивности, которые можно получить с различными видами сердечников при использовании провода различных марок.

На рис. 54—63 показаны графики, позволяющие с достаточной для практических целей точностью определить конструктивные данные, необходимые для намотки катушек с сердечниками СБ-12а—СБ-34а. Графики построены для катушек, в которых применялись каркасы без секций, изготовленные из органического стекла.

Броневые сердечники типа Б изготавливаются из феррита марки 2000НМ1, 2000НМ, 1500НМ2, 1500НМ3 и др. Для диапазона частот

Таблица 23

**Максимальная индуктивность катушек с броневыми сердечниками типа СБ**

| Марка провода | Тип сердечника | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | СБ-12а | | СБ-23-11а | | СБ-23-17а | | СБ-28а | | СБ-34а | |
| | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* | *w* | *L* |
| ПЭВ 0,1 | 570 | 7 | 650 | 24 | 1 350 | 95 | 3 000 | 440 | 4 350 | 920 |
| ПЭВ 0,15 | 230 | 1,35 | 275 | 4,2 | 590 | 17,5 | 1 300 | 89 | 2 290 | 250 |
| ПЭВ 0,2 | 108 | 0,24 | 144 | 1,1 | 375 | 6,9 | 700 | 23,5 | 1 090 | 57 |
| ПЭЛШО 0,1 | 164 | 0,56 | 210 | 2,5 | 480 | 11,7 | 945 | 47,5 | 1 610 | 125 |
| ЛЭШО 7×0,07 | 58 | 0,07 | 67 | 0,24 | 160 | 1,25 | 386 | 7,1 | 616 | 18 |

Примечание. *w* — число витков; *L* — индуктивность, *мгн*.

5—100 *Мгц* применяются никель-цинковые ферриты группы ВЧ с начальной магнитной проницаемостью от 150 до 20. Для контурных катушек индуктивности рекомендуются термостабильные ферриты марок 20ВЧ и 50ВЧ; некоторые практические данные о катушках

Таблица 24

**Основные данные броневых сердечников из феррита**

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Б6 | Б9 | Б11 | Б14 | Б18 |
| $D_1$ | 6,5 | 9 | 11 | 14 | 18 |
| $D_2$ | 5,1 | 7,6 | 9,4 | 11,8 | 14 |
| $D_3$ | 2,7 | 3,5 | 3,7 | 6 | 7,4 |
| $H_1$ | 5,6 | 5,6 | 6,4 | 8,4 | 10,6 |
| $H_2$ | 4 | 4 | 4,4 | 5,8 | 7,4 |
| Подстроечник гладкий | 0,9×6 | 1,5×9 | 1,5×9 | 2,5×12 | 2,5×12 |

*Продолжение табл. 24*

| Размеры, *мм* | Тип сердечника | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Б22 | Б26 | Б30 | Б36 | Б48 |
| $D_1$ | 22 | 26 | 30 | 36 | 48 |
| $D_2$ | 18,3 | 21,6 | 25,4 | 30,5 | 40 |
| $D_3$ | 9,2 | 11,3 | 12,3 | 16 | 20 |
| $H_1$ | 13,6 | 16,4 | 19 | 22 | 31,4 |
| $H_2$ | 9,4 | 11,2 | 13,2 | 14,8 | 20,8 |
| Подстроечник гладкий | 3,5×16 | 4,5×20 | 4,5×22 | 4,5×22 | 6,5×32 |

индуктивности с сердечниками из этих ферритов приведены на рис. 64.

Броневые сердечники из феррита имеют общий объем и высоту примерно в 1,5 раза меньше, чем у близких к ним по размерам сер-

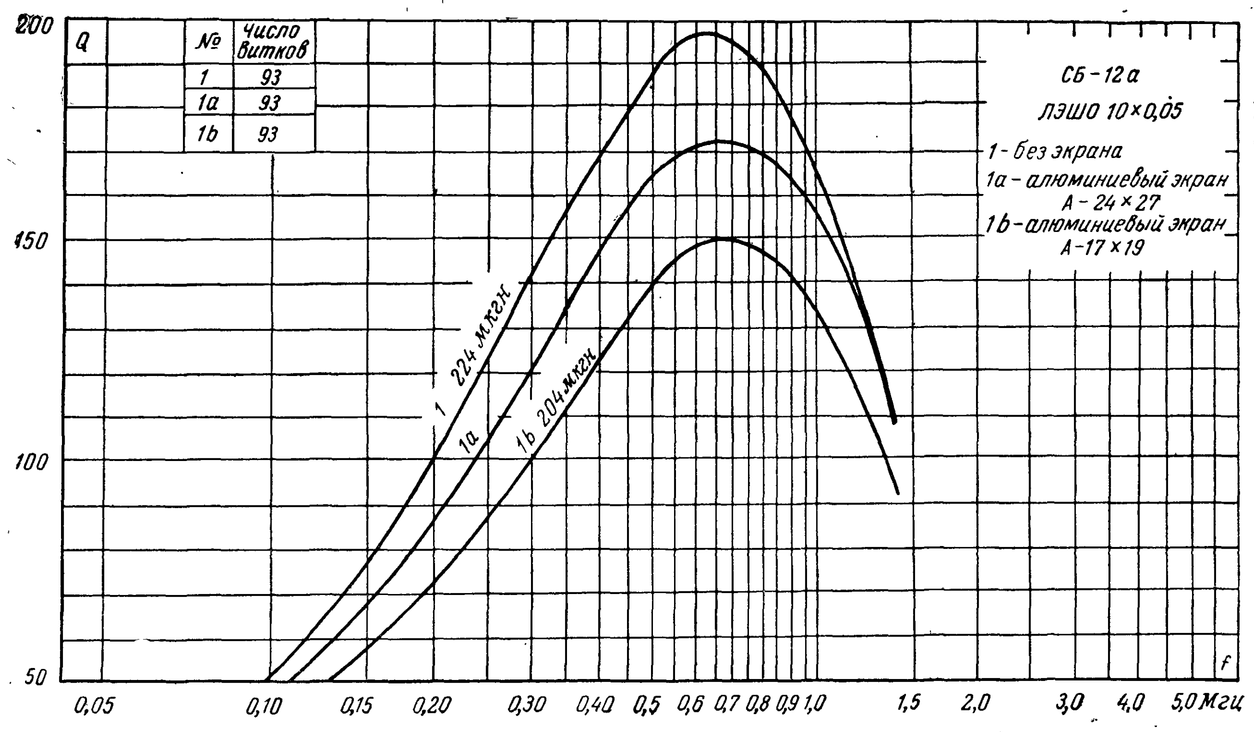



Рис. 54. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-12а.

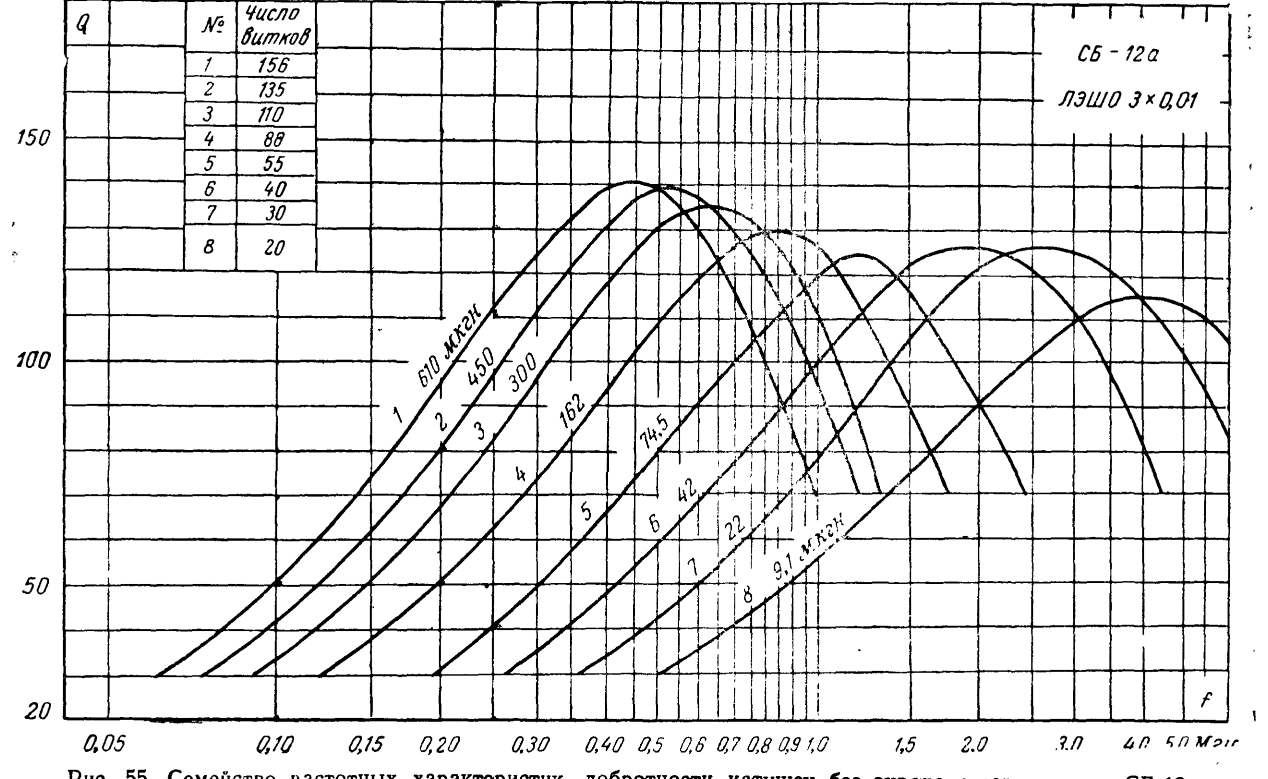



Рис. 55. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-12а.

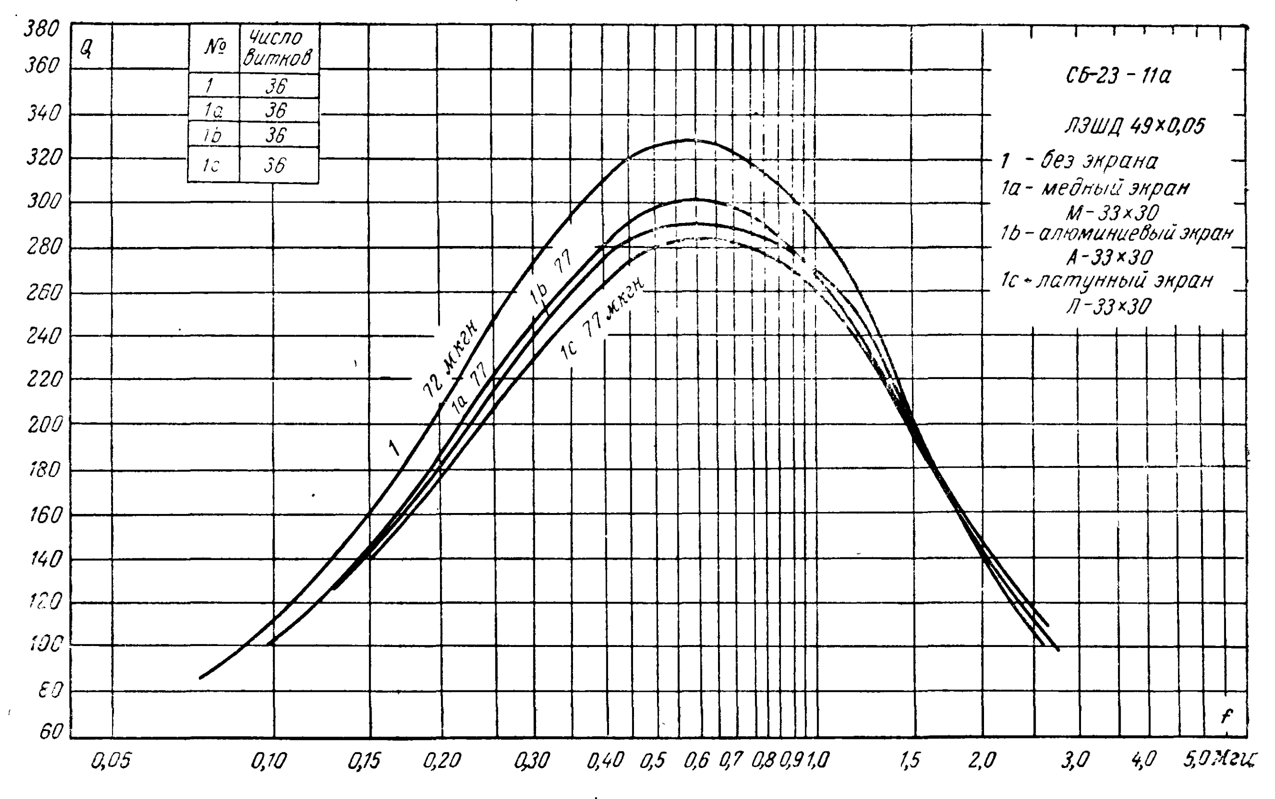



Рис. 56. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-23-11а.

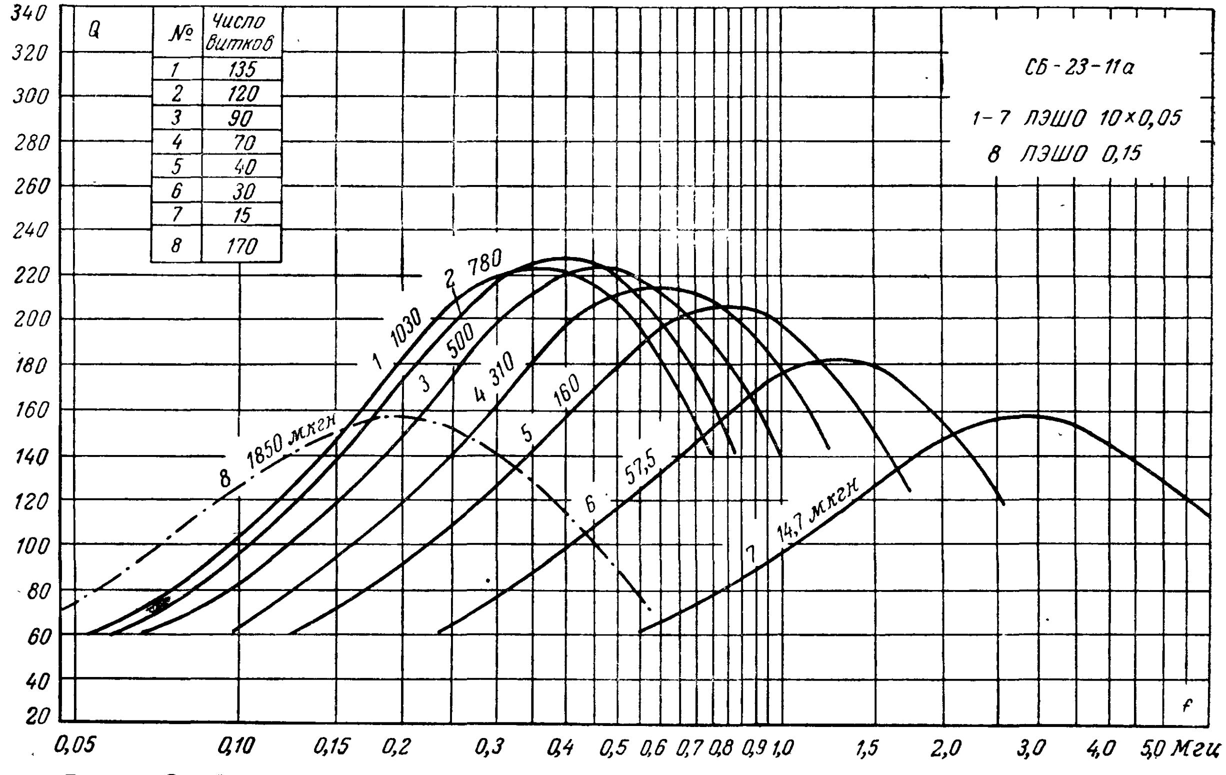



Рис. 57. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-23-11а.

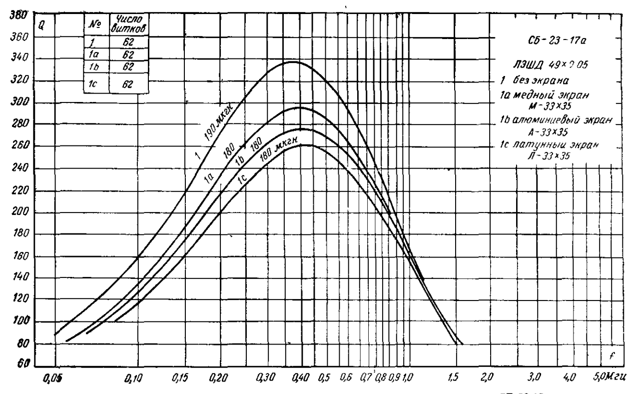



Рис. 58 Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-23-17а.

| № | Число витков |
|---|---|
| 1 | 130 |
| 2 | 107 |
| 3 | 84 |
| 4 | 64 |
| 5 | 42 |
| 6 | 30 |
| 7 | 22 |
| 8 | 17 |
| 9 | 187 |

СБ-23-17а

ЛЭШО 21×0,05

Q: 340, 320, 300, 280, 260, 240, 220, 200, 180, 160, 140, 120, 100, 80, 60, 40, 20

f: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мгц

9 2100 мкгн Галетная намотка

1 696

2 600

3 376

4 226

5 100

6 52

7 24

8 15 мкгн

Рис. 59. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-23-17а.

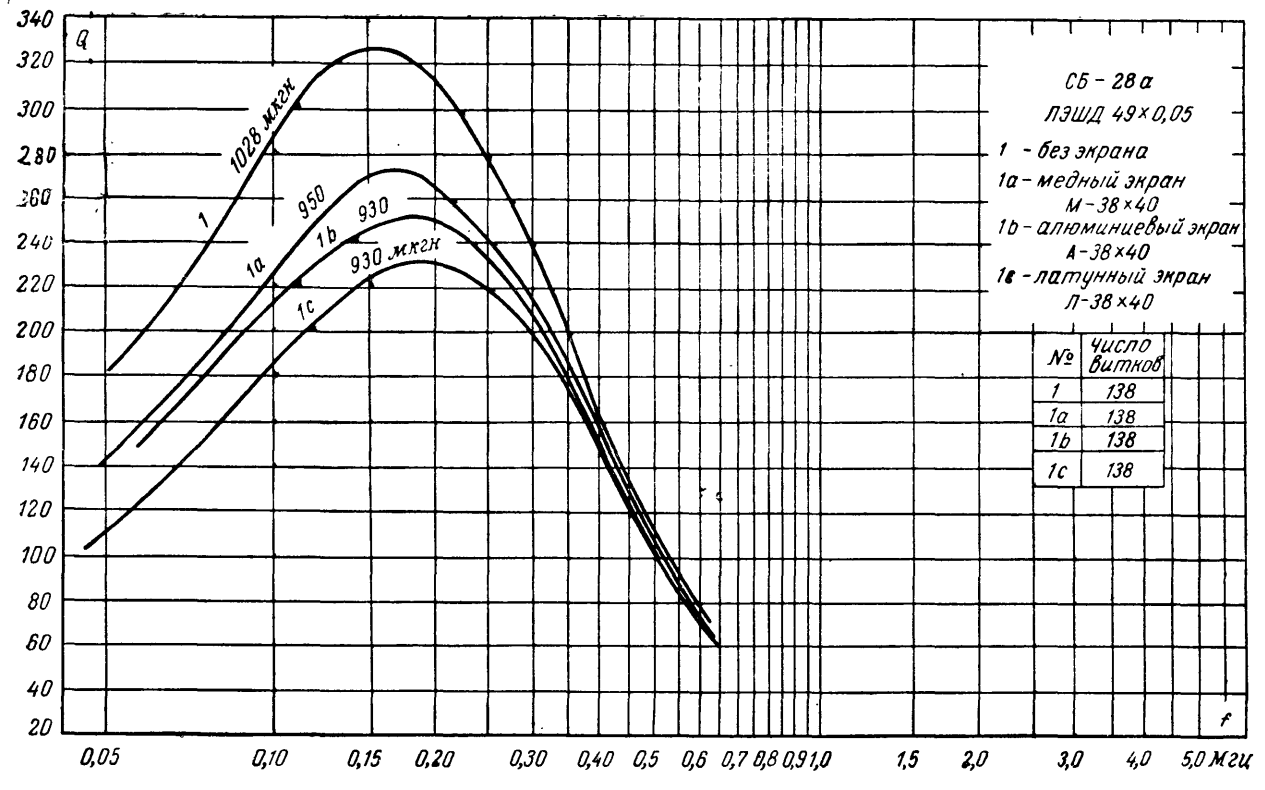



Рис. 60. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-28а.

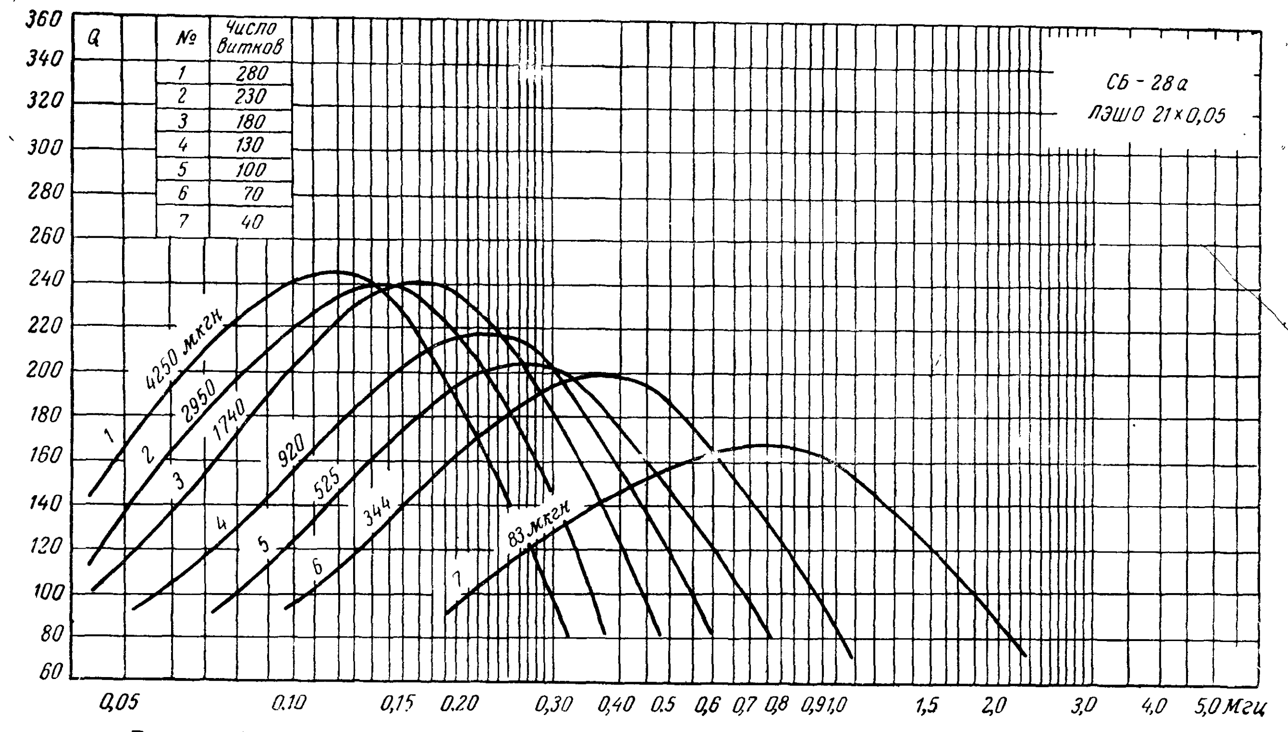



Рис. 61. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-28а.

6—2585

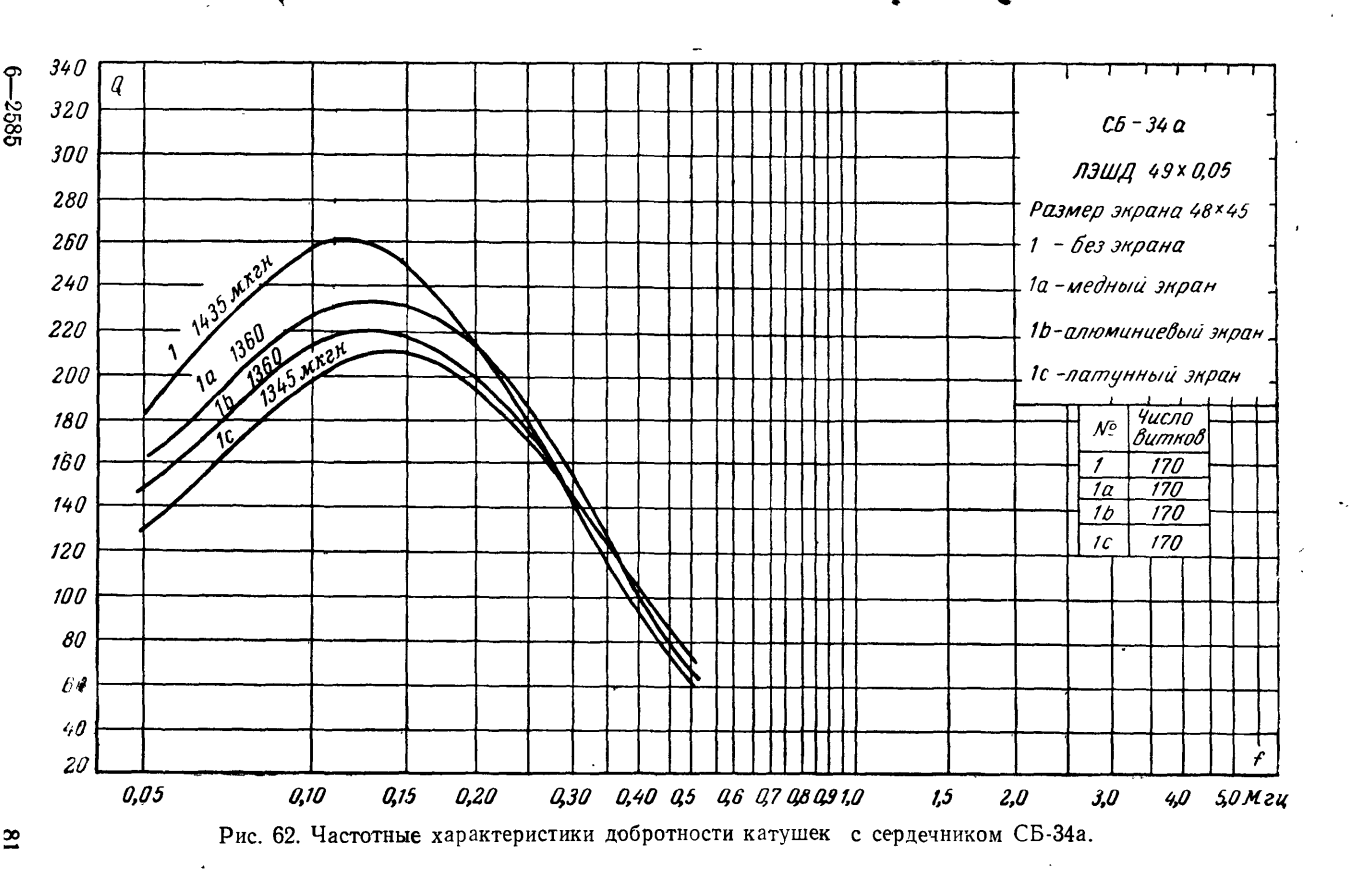



Рис. 62. Частотные характеристики добротности катушек с сердечником СБ-34а.

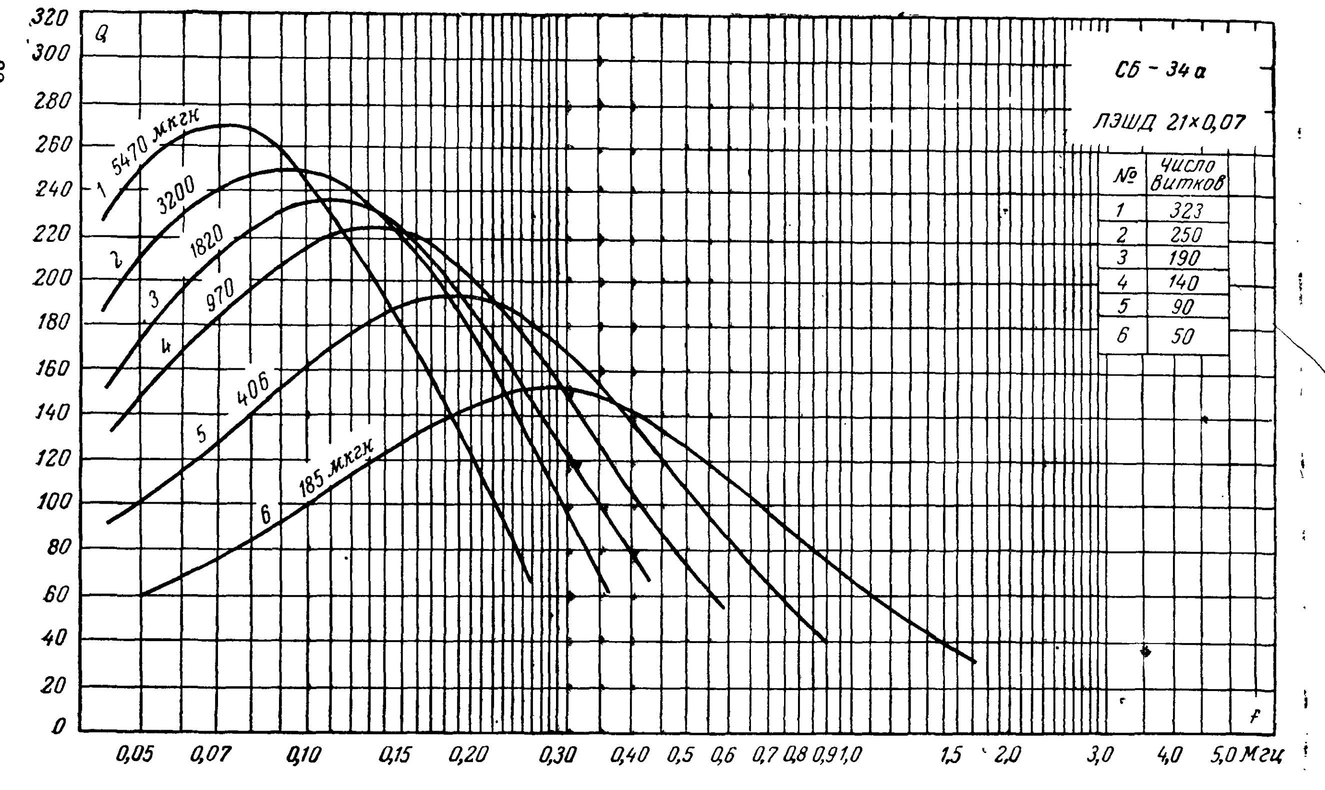



Рис. 63. Семейство частотных характеристик добротности катушек без экрана с сердечником СБ-34а.

дечников типа СБ, например, Б11 и СБ-12а или Б22 и СБ-23-17а, а объем обмоточного пространства лишь незначительно меньше. Основные параметры броневых сердечников из феррита приведены в табл. 24.

Для определения по заданным значениям $\mu_{эфф}$ и индуктивности числа витков катушек с сердечниками типа Б на рис. 65 представлена номограмма, по которой определяется вспомогательный коэффициент $a$, а число витков определяется по формуле

$$w = ak,$$

где $k$ — коэффициент, значения которого приведены в табл. 25.

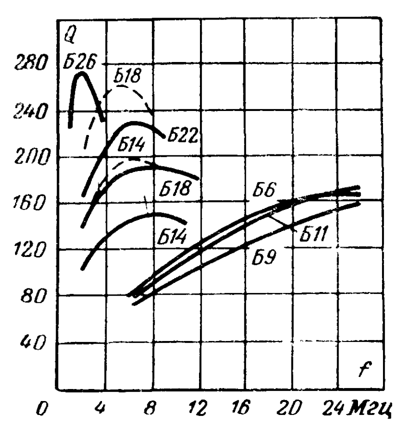



Рис. 64. Зависимость добротности $Q$ катушек индуктивности на сердечниках ряда Б из ферритов 20ВЧ (сплошные линии) и 50ВЧ2 (пунктирные линии) от частоты.

Номограммы на рис. 66 и 67 дают зависимость между числом витков $w$, сопротивлением обмотки постоянному току $R$ и диаметром провода $d$ катушки, намотанной до полного заполнения односекционного каркаса для различных сердечников. На номограммах по оси ординат отложены числа витков, а по оси абсцисс — диаметр провода без изоляции.

Таблица 25

**Значения коэффициента $k$**

| Тип сердечника | Коэффициент $k$ | Тип сердечника | Коэффициент $k$ |
|---|---|---|---|
| Б6 | 4,13 | Б22 | 2,13 |
| Б9 | 3,65 | Б26 | 1,90 |
| Б11 | 2,93 | Б30 | 1,86 |
| Б14 | 2,66 | Б36 | 1,55 |
| Б18 | 2,27 | Б48 | 1,40 |

Номограммы на рис. 68 дают зависимость между числом витков, сопротивлением обмотки постоянному току и сечением провода ЛЭШО обмотки катушки с сердечниками типа Б.

Катушки индуктивности с броневыми сердечниками, выполненными из феррита, имеют высокие значения добротности (рис. 69). Добротность катушки с сердечником зависит от потерь, вносимых катушкой и сердечником

$$Q = \frac{\omega L}{R_0 + R_c},$$

где $L$ — индуктивность катушки с сердечником;

$R_0$ — сопротивление потерь катушки;
$R_c$ — сопротивление потерь, вносимое сердечником.
Принимая добротность обмотки равной

$$Q_0 = \frac{\omega L}{R_0}$$

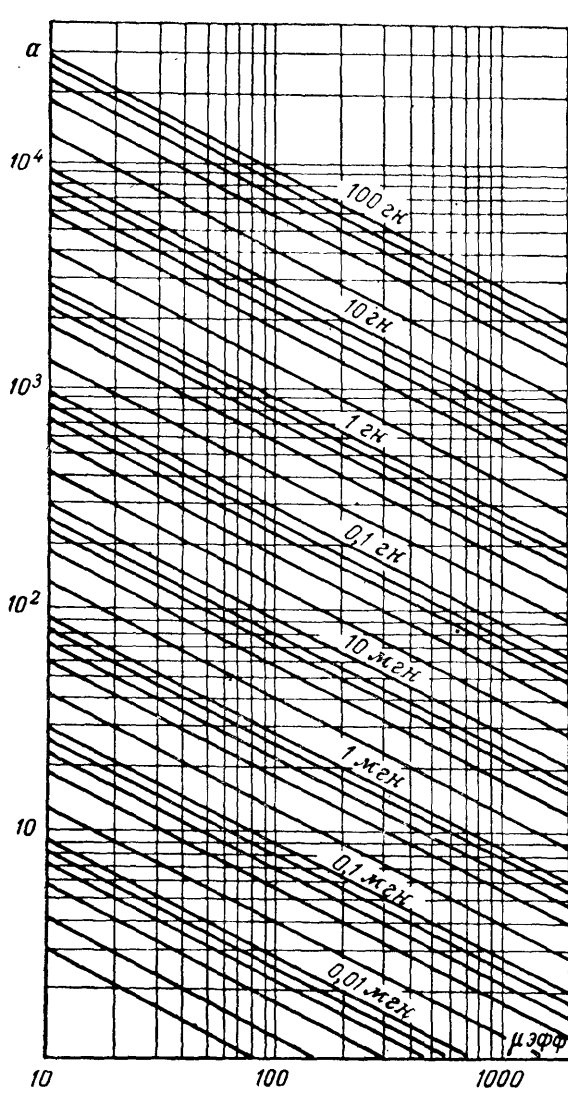



Рис. 65. Номограмма для расчета числа витков катушек с сердечниками ряда Б.

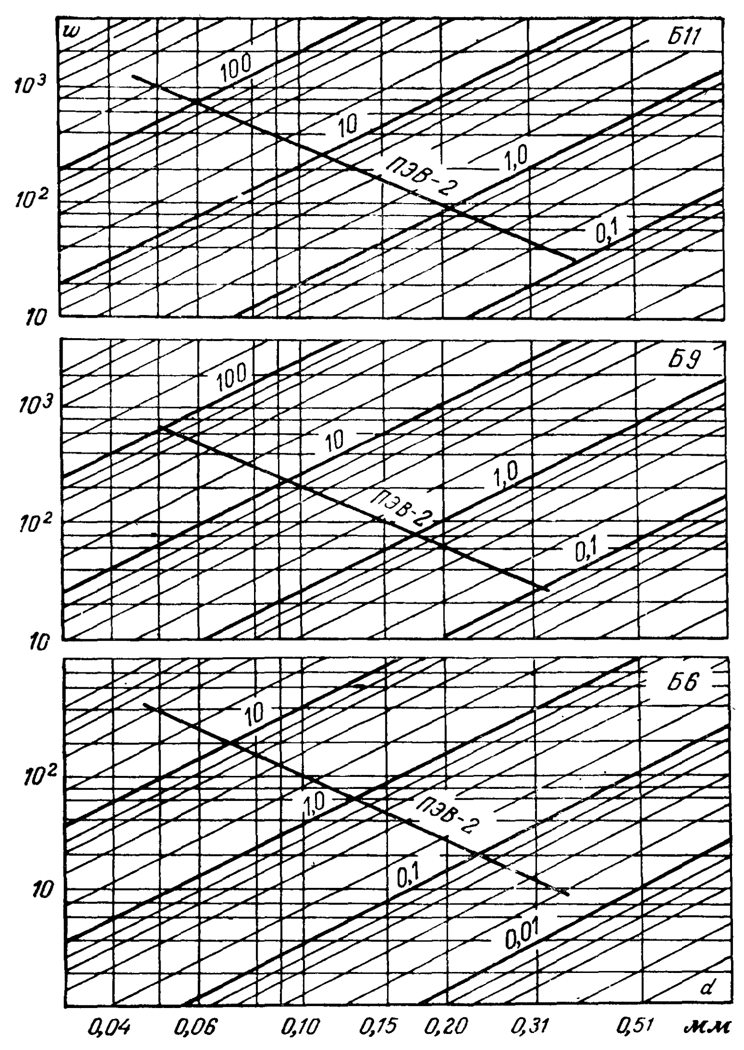



Рис. 66. Зависимость между числом витков $w$, сопротивлением постоянному току и диаметром провода $d$ катушек с сердечниками Б6, Б9 и Б11.

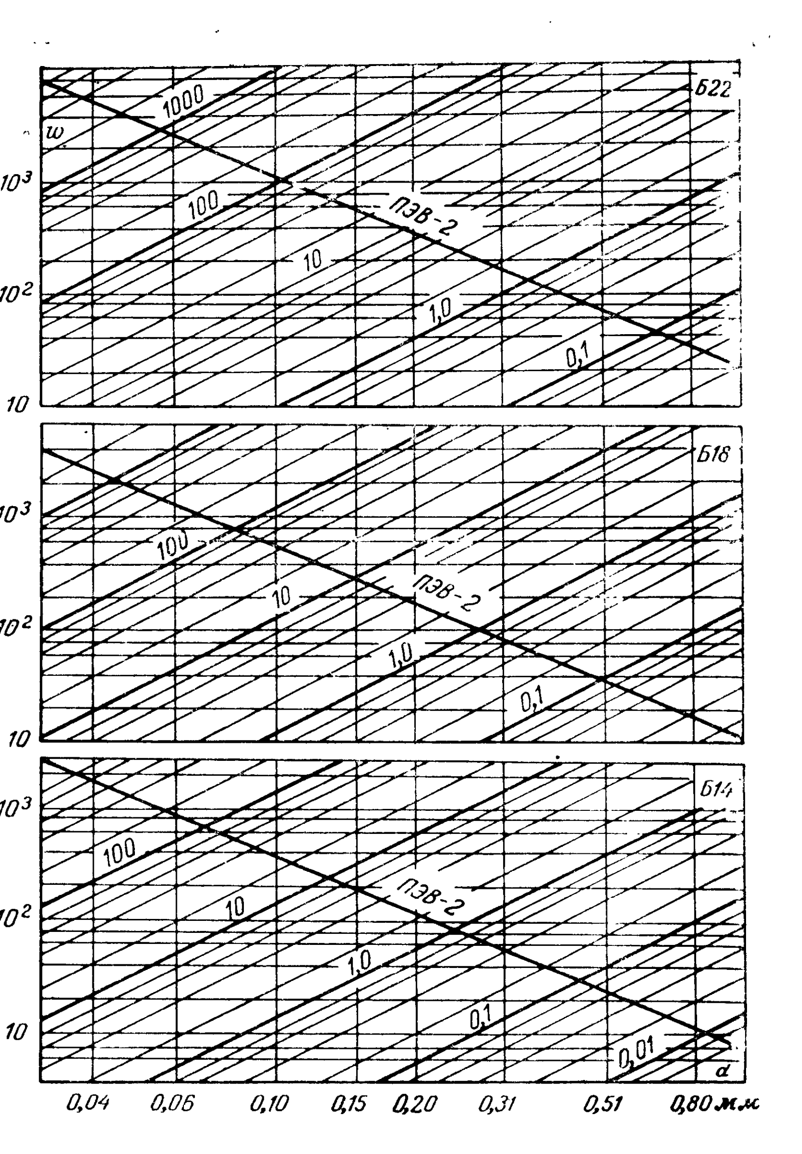



Рис. 67. Зависимость между числом витков *w*, сопротивлением постоянному току и диаметром провода *d* катушек с сердечниками Б14, Б18 и Б22.

и добротность сердечника

$$Q_c = \frac{\omega L}{R_c},$$

добротность катушки с сердечником

$$Q = \frac{Q_0 Q_c}{Q_0 + Q_c}.$$

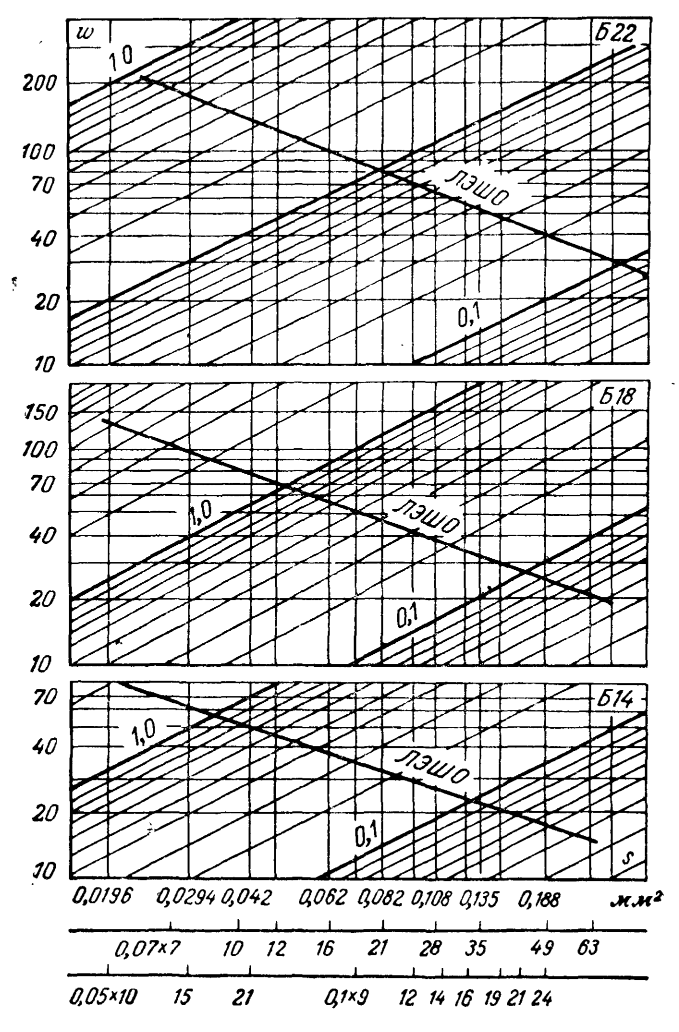



Рис. 68. Зависимость между числом витков $w$, сопротивлением постоянному току и сечением $s$ провода ЛЭШО катушек с сердечниками Б14, Б18 и Б22.

Для катушек с замкнутым сердечником $Q_c = Q_м$, следовательно,

$$Q = \frac{Q_0 Q_м}{Q_0 + Q_м},$$

где $Q_м$ — добротность материала сердечника, равная $1/\operatorname{tg} \delta_c$.

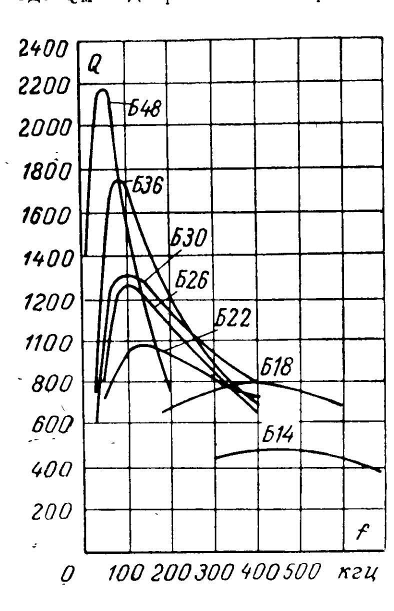



Рис. 69. Зависимость добротности $Q$ катушек, выполненных на сердечниках ряда Б из феррита 1000НМ3 от частоты.

Если используется сердечник с зазором, то его добротность будет равна

$$Q'_c = Q_c \left(1 + \mu_0 \frac{l_з}{l_{ср}}\right).$$

Добротность обмотки при этом

$$Q'_0 = \frac{Q_0}{1 + \mu_0 \frac{l_з}{l_{ср}}},$$

где $\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость сердечника;

$l_{ср}$ — средняя длина магнитной линии сердечника без учета зазора, *мм*.

Если добротность обмотки с сердечником без зазора выше добротности материала сердечника, то введение зазора повышает добротность сердечника и общую добротность катушки. При определенной величине зазора добротность катушки будет максимальной. Зазор, обеспечивающий наибольшую добротность, называется оптимальным и может быть определен по формуле

$$l_з = \frac{l_{ср}}{\mu_0} \left(\sqrt{\frac{Q_0}{Q_c}} - 1\right).$$

Таблица 26

**Параметры катушек**

| Тип сердечника | Кривая | $\mu_{эфф}$ | $l_з$, *мм* | $L$, *мгн* | $w$ | Провод ЛЭШО | $R_0$, *ом* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Б48 | 1 | 340 | 0,10 | 15,3 | 82 | 119×0,07 | 0,33 |
| | 2 | 240 | 0,16 | 10,7 | | | |
| | 3 | 160 | 0,27 | 7,5 | | | |
| | 4 | 130 | 0,35 | 6,0 | | | |
| | 5 | 100 | 0,50 | 4,5 | | | |
| Б14 | 6 | 102 | 0,13 | 0,42 | 48 | 21×0,05 | 0,70 |
| | 7 | 80 | 0,19 | 0,33 | | | |
| | 8 | 59 | 0,30 | 0,25 | | | |
| | 9 | 38 | 0,58 | 0,16 | | | |

Если величина $l_з$ получается отрицательной, то введение зазора не увеличивает добротность. Максимальная добротность катушки с сердечником, в котором обеспечен оптимальный зазор, определяется по формуле

$$Q_{макс} = 0,5\sqrt{Q_0 Q_м}.$$

На рис. 70 показана зависимость добротности $Q$ катушек индуктивности с сердечниками из феррита марки 1000НМ3 от частоты $f$ и зазора $l_з$, величина которого приведена в табл. 26.

Точный конструктивный расчет катушек с замкнутыми сердечниками затруднителен, поэтому для расчетов целесообразно использовать графики и номограммы, приведенные в этой главе.

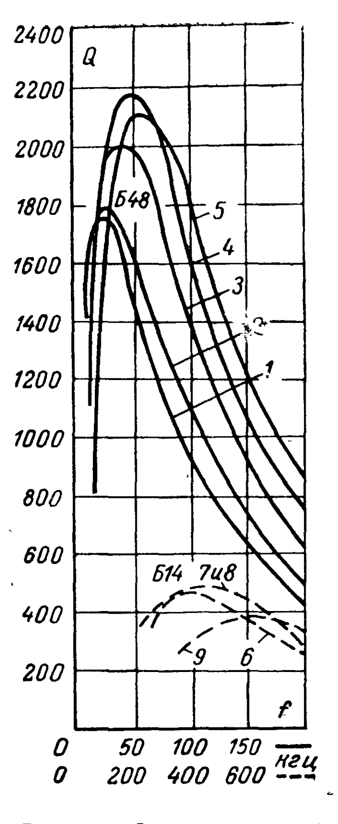



Рис. 70. Зависимость добротности $Q$ катушек, выполненных на сердечниках ряда Б из феррита 1000НМ3 от частоты $f$ и зазора $l_з$.

## Температурная стабильность катушек с магнитными сердечниками

Изменение индуктивности под влиянием температуры характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ), который показывает относительное изменение величины индуктивности, приходящееся на 1° С изменения температуры

$$ТКИ = \frac{\Delta L}{L \Delta t^\circ},$$

где $\Delta L$ — изменение индуктивности;

$\Delta t^\circ$ — изменение температуры.

Для катушки с сердечником ТКИ будет определяться как температурным коэффициентом индуктивности катушки, так и температурным коэффициентом проницаемости сердечника ТК $\mu$. Величина ТК $\mu$ зависит от сорта магнитного материала и условий его изготовления.

Ферриты имеют большие значения температурного коэффициента проницаемости. Чем выше начальная проницаемость, тем сильнее она изменяется при изменении температуры. Поэтому в большинстве случаев ферритовые сердечники используют с немагнитным зазором.

Для катушек с тороидальными и броневыми ферритовыми сердечниками можно считать, что изменение индуктивности катушки от температуры происходит только за счет изменения магнитной проницаемости сердечника. При изменении температуры изменяется не только проницаемость сердечника, но и тангенс угла потерь. Чем выше проницаемость феррита, тем более резко зависит $\operatorname{tg}\delta_c$ от тем-

пературы. При конструировании стабильных катушек индуктивности необходимо учитывать и фактор изменения их добротности от температуры.

Температурный коэффициент индуктивности катушки с сердечником из феррита, имеющим небольшой зазор ($l_з/l_{ср} \leqslant 0{,}01$), может быть определен по формуле

$$ТКИ = \frac{ТК\mu}{1 + \frac{l_з}{l_{ср}}\mu_0},$$

где $\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитная проницаемость сердечника с зазором определяется по формуле

$$\mu_з = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \frac{a}{b}},$$

где $a = l_з/l_{ср}$ — отношение длины зазора к длине магнитной линии сердечника;

$b = S_з/S_c$ — отношение сечения зазора к сечению сердечника (обычно $b = 1$).

Практически ТКИ катушек на броневых сердечниках без зазора из ферритов составляет $(250 \div 300) \cdot 10^{-6}$, а ТКИ катушек на сердечниках с зазором несколько меньше.

Магнитная проницаемость сердечников из карбонильного железа в диапазоне температур от $-60$ до $+100°$ С линейно возрастает с увеличением температуры. Температурный коэффициент индуктивности катушек на броневых сердечниках без зазора из карбонильного железа составляет $(60 \div 100) \cdot 10^{-6}$.

## Дроссели высокой частоты

Дросселем высокой частоты называют катушку индуктивности, включамую в цепь для ограничения токов высокой частоты. В некоторых случаях дросселем называют катушку индуктивности, включаемую в электрическую цепь для получения частотной или фазовой коррекции. Индуктивность высокочастотного дросселя должна быть максимальной при минимальной величине собственной емкости. Ориентировочно индуктивность дросселя должна быть в 10—50 раз больше индуктивности катушки контура, к которому он подключен, так как он изменяет индуктивность и добротность катушек контура. Эквивалентные значения параметров цепи будут равны:

$$L_э = \frac{L_к L_{др}}{L_к + L_{др}};$$

$$Q_э = \frac{Q_к Q_{др}(L_к + L_{др})}{Q_к L_к + Q_{др} L_{др}},$$

поэтому необходимо, чтобы $L_{др} \gg L_к$.

Конструктивно дроссели высокой частоты выполняются в виде однослойных или многослойных катушек. Конструкции дросселей показаны на рис. 71. Для дросселей длинных и средних волн применя-

ется секционированная многослойная намотка. Дроссели для коротких и метровых волн имеют сплошную однослойную намотку, иногда с переменным шагом для улучшения диапазонных свойств. В качестве каркасов для этих дросселей используются керамические стержни от непроволочных постоянных резисторов (тип ВС). Дроссели с малым числом витков и диаметром 3—5 *мм* делаются бескаркасными.

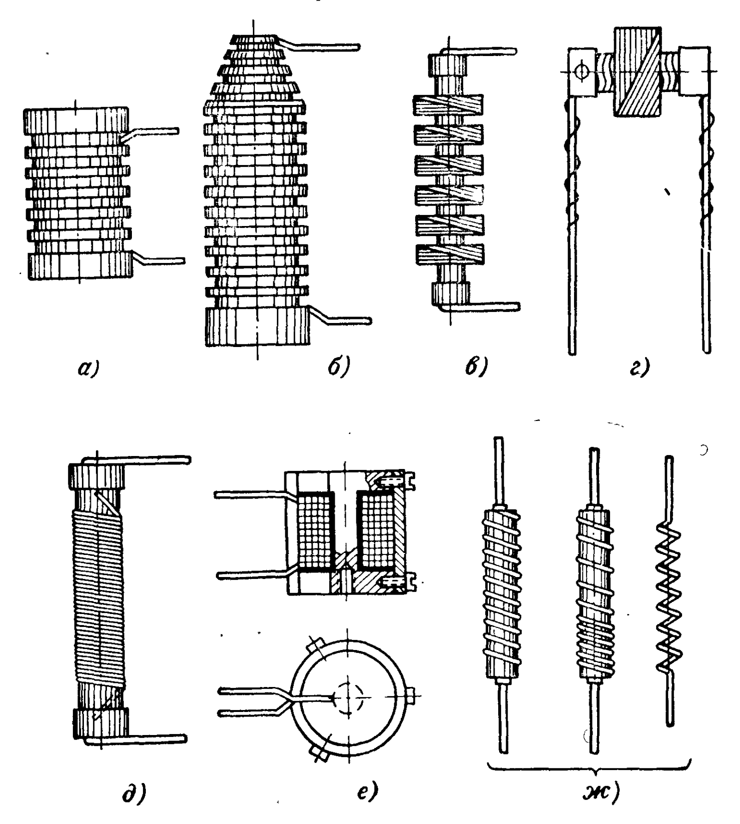



Рис. 71. Устройство дросселей высокой частоты.

*а* — для длинных волн; *б* — для широкого диапазона; *в* — для средних волн; *г* — корректирующий; *д* — для коротких волн; *е* — дроссель накала со стальным сердечником; *ж* — дроссель для УКВ.

Для получения достаточной индуктивности при малых диаметрах дросселя необходимо намотку вести тонким проводом диаметром от 0,05 до 0,2 *мм*. Длина намотки берется в пределах от двух до четырех диаметров $D$ каркаса. Катушки короче $2D$ имеют недотаточную индуктивность, а катушки длиннее $4D$ имеют значительную собственную емкость.

Расчет дросселей высокой частоты заключается в определении индуктивности, собственной емкости и сопротивления. Формулы для

расчета дросселей аналогичны формулам для расчета катушек индуктивности.

Для определения числа витков дросселей УКВ можно воспользоваться графиками, представленными на рис. 72, где график *I* отно-

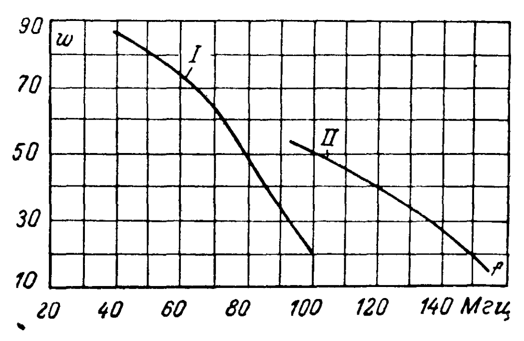



Рис. 72. Графики для расчета дросселей УКВ.

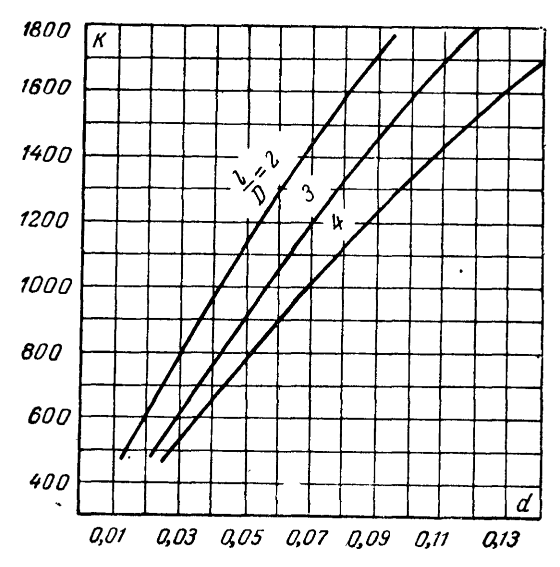



Рис. 73. График для определения коэффициента *k*.

сится к дросселю с диаметром намотки 10 и длиной 20 *мм*, а график *II* — к дросселю с диаметром намотки 5,5 и длиной 12 *мм*. Диаметр провода в обоих случаях 0,17 *мм*.

На рис. 73 показан график для расчета дросселей на частоты от 30 до 1 000 *Мгц*. По графику определяется вспомогательный коэф-

$f_0$, Мгц

0,1 0,2 0,4 0,5 1 2 4 6 10 20 40 60 100 200

$R_{макс}$, ом

10 15 20 30 40 60 80 100

$L_{др.н}$ мкгн

1000 600 400 200 100 60 40 20 10 6 4 2 1 0,6 0,4 0,2 0,1

M

дб: 40 30 20 10 0

отн: 100 60 40 20 10 6 4 2 1

Вспомогательная ось

Схема пользования

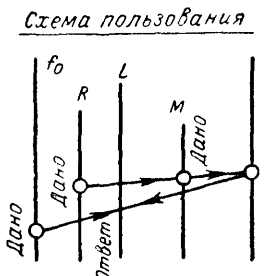



Рис. 74. Номограмма для расчета дросселей накала.

фициент $k$, который связывает значение диаметра провода и конструктивные размеры дросселя соотношением длины намотки к диаметру намотки $l/D=2$; 3; 4. Диаметр каркаса определяется рабочей частотой дросселя, т. е.

$$D=\sqrt{\frac{k}{f}},$$

где $D$ — диаметр каркаса дросселя, *мм*;

$f$ — частота, для которой рассчитывается дроссель, *Мгц*.

Индуктивность дросселей питания ориентировочно можно выбрать по табл. 27. Меньшие значения индуктивности относятся к дросселям накала ламп.

Таблица 27

**Индуктивность дросселей питания**

| $f$, *Мгц* . . . . | До 0,5 | 1 | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|
| $L_{др}$, *мкгн* . . . | $(1\div10)\cdot10^3$ | 250—1500 | 80—400 | 30—150 | 15—80 |

*Продолжение табл. 27*

| $f$, *Мгц* . . . . | 50 | 100 | 200 | 500 |
|---|---|---|---|---|
| $L_{др}$, *мкгн* . . . | 4—24 | 1,7—8 | 0,6—2,5 | 0,15—0,4 |

На рис. 74 показана номограмма для расчета дросселей накала. Величина $R_н$ равна:

$$R_н=\frac{U_н}{I_н},$$

где $U_н$ и $I_н$ — напряжение и ток накала.

Величина $M$ показывает относительное ограничение токов высокой частоты.

## Катушки индуктивности с сердечниками из ферромагнитных материалов

В цепях низких частот большое применение находят катушки с индуктивностью порядка единиц, десятков и даже сотен генри. Для этих катушек используют сердечники с замкнутой магнитной цепью из ферромагнитных материалов. К таким материалам относятся: электротехническая сталь, пермаллой, пермендюр и др. Некоторые свойства ферромагнитных материалов приведены в табл. 28.

Характерной особенностью катушек с ферромагнитными сердечниками является зависимость их индуктивности от величины переменного напряжения на обмотках, его частоты и тока постоянного подмагничивания.

Магнитные материалы характеризуются значительным числом параметров, однако на параметры катушек наибольшее влияние оказывает магнитная проницаемость материала.

## Некоторые свойства магнитных материалов

| Наименование и марка материала | Толщина, *мм* | Магнитная проницаемость $\mu_0$ | Магнитная проницаемость $\mu_{макс}$ | Индукция насыщения $B_{макс}$, *тл* |
|---|---|---|---|---|
| Электротехническая сталь | | | | |
| Э41, Э42 | 0,3—0,5 | 350—400 | | |
| Э44 | 0,1—0,2 | До 500 | | |
| Э46, Э48 | 0,35 | До 300 | 6 000—7 000 | 1,8—2,0 |
| Э310 | 0,2—0,5 | До 500 | | |
| Пермаллой | | | | |
| 80НХС | 0,05—0,15 | 18 000—25 000 | 40 000—70 000 | 0,7—0,75 |
| | 0,18—0,4 | 25 000—35 000 | | |
| 79НМ | 0,02 | 18 000—20 000 | 80 000—150 000 | 0,7—0,75 |
| 50НХС | 0,05—0,15 | 1 600—2 500 | 11 000—14 000 | 1,0 |
| 45Н | 0,05—0,15 | 1 700—2 500 | 15 000 | 1,5 |
| Пермендюр | 0,2—0,5 | 700—1 100 | 4 000 | 2,2—2,4 |

Магнитная проницаемость определяется отношением переменных составляющих индукции и напряженности магнитного поля. Ее величина в слабых полях называется начальной магнитной проницаемостью $\mu_0$. С увеличением индукции проницаемость повышается до определенного предела $\mu_{макс}$, определяемого свойствами магнитного материала. При дальнейшем увеличении индукции проницаемость резко падает. Проницаемость при постоянном подмагничивании характеризуется динамической проницаемостью $\mu_д$.

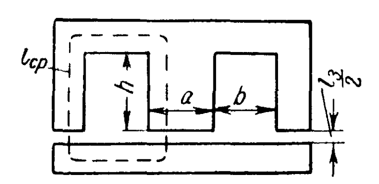



Рис. 75. Длина магнитного пути в Ш-образном сердечнике.

Индуктивность катушки, имеющей замкнутый сердечник, определяется по формуле

$$L = \frac{1,26 w^2 S_c \mu_0}{l_{ср}} 10^{-8},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*;

$w$ — число витков;

$S_c$ — сечение сердечника, *см*$^2$;

$\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость материала сердечника;

$l_{ср}$ — средняя длина магнитной линии магнитопровода, *см*.

Средняя длина магнитной линии магнитопровода с равномерным сечением (рис. 75) равна:

$$l_{ср} = 2\left(b + h + \frac{\pi a}{4}\right).$$

Формула для расчета величины индуктивности дает точные результаты лишь в том случае, когда по обмотке катушки не протекает постоянный ток и индуктивность определяется для переменной составляющей с незначительной амплитудой.

Если в качестве сердечника катушки применяется сердечник из электротехнической стали, то основную формулу для расчета величины индуктивности можно представить в виде

$$L = \frac{w^2 S_c}{2 l_{cp}} 10^{-5}.$$

При расчете по этой формуле имеется в виду, что магнитная проницаемость материала сердечника равна 400 без тока подмагничивания. Число витков катушки при заданной индуктивности можно определить по упрощенной формуле

$$w = 450 \sqrt{\frac{L l_{cp}}{S_c}}.$$

При расчете числа витков для катушек, выполненных на сердечнике с магнитной проницаемостью, отличной от 400, формула имеет вид:

$$w = 8\,920 \sqrt{\frac{L l_{cp}}{\mu_0 S_c}},$$

где $L$ — индуктивность катушки, *гн*;
$l_{cp}$ — средняя длина магнитной линии магнитопровода, *см*;
$S_c$ — сечение сердечника, *см*$^2$;
$\mu_0$ — начальная магнитная проницаемость.

Для упрощения расчетов на рис. 76 показан график расчета числа витков катушек при различных соотношениях $S_c/l_{cp}$.

Для расчета катушек с постоянным подмагничиванием предварительно определяется величина динамической магнитной проницаемости $\mu_д$. При определении динамической магнитной проницаемости необходимо вычислить амплитуду индукции $B_m$ и постоянные ампервитки $(aw)_0$.

Амплитуда индукции равна

$$B_m = \frac{U \cdot 10^4}{4{,}44 S_c f w},$$

где $B_m$ — амплитуда индукции, *тл*;
$U$ — переменное напряжение на обмотке, *в*;
$f$ — частота, *гц*;
$S_c$ — сечение сердечника, *см*$^2$.

Постоянная составляющая напряженности магнитного поля равна:

$$H_0 = 4\pi \frac{w I_0}{l_{cp}} = 4\pi (aw)_0,$$

т. е. она пропорциональна величине

$$(aw)_0 = \frac{w I_0}{l_{cp}},$$

где $I_0$ — ток подмагничивания, *а*.

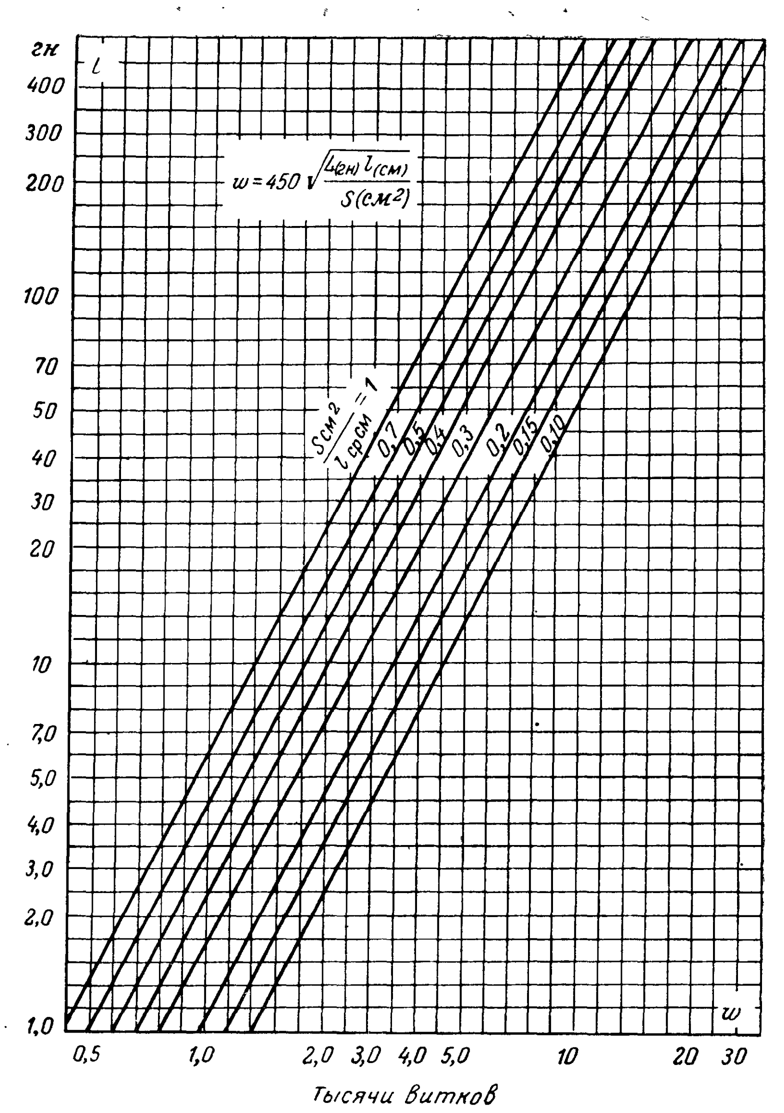



Рис. 76. График для расчета числа витков катушек с ферромагнитными сердечниками.

Величина $(aw)_0$ называется постоянными ампер-витками на сантиметр и удобна для расчетов, так как поддается непосредственному вычислению.

На рис. 77 показан график для определения динамической проницаемости некоторых материалов в зависимости от $B_m$, а на рис. 78 — в зависимости от $(aw)_0$ и $B_m$.

Для уменьшения постоянной составляющей напряженности магнитного поля в сердечник вводится немагнитный зазор, который увеличивает сопротивление магнитной цепи.

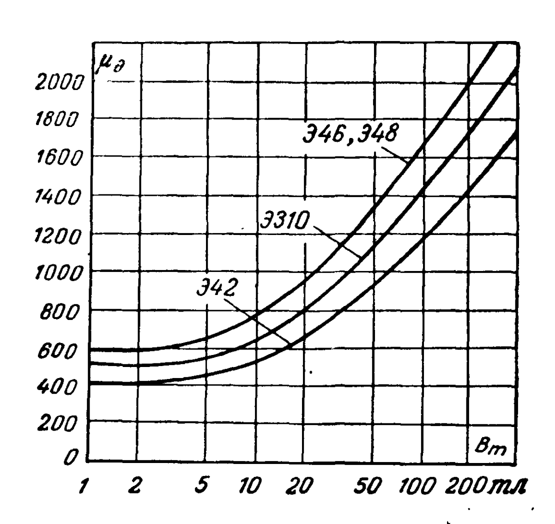



Рис. 77. График зависимости динамической магнитной проницаемости от индукции $B_m$.

Индуктивность катушки, в магнитопроводе которой имеется зазор $l_з$, будет равна:

$$L = \frac{1,26}{\frac{1}{\mu_0} + \frac{l_з}{l_{ср}}} \frac{w^2 S_c}{l_{ср}} \cdot 10^{-8}.$$

Если обозначить

$$\mu_э = \frac{1}{\frac{1}{\mu_0} + \frac{l_з}{l_{ср}}}$$

и назвать эту величину эквивалентной магнитной проницаемостью, то вычислять индуктивность можно по вышеприведенным формулам, заменив $\mu_0$ на $\mu_э$.

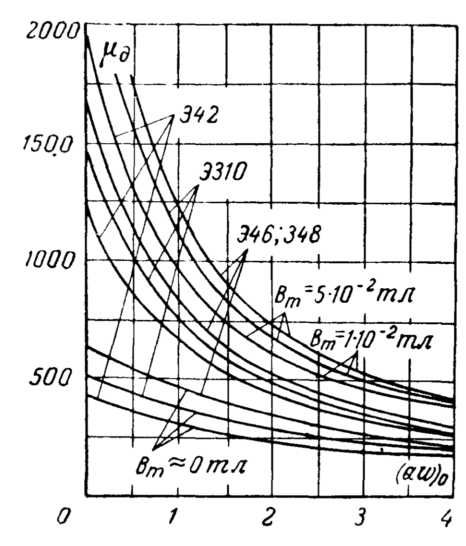



Рис. 78. График зависимости динамической магнитной проницаемости от индукции $B_m$ и постоянного подмагничивания $(aw)_0$.

Величина оптимального немагнитного зазора в сердечнике определяется по формуле

$$l_з = \frac{z l_{ср}}{100},$$

где $z$ — коэффициент, определяемый из графика на рис. 79.

Выбрать величину немагнитного зазора можно с помощью графика, показанного на рис. 80. Для вычисления $l_з$ по этому графику необходимо вычислить вспомогательную величину $k$, равную

$$k = \frac{L I_0^2}{V},$$

где $L$ — требуемая индуктивность катушки, *гн*;

$I_0$ — подмагничивающий ток, *ма*;

$V$ — объем сердечника, равный $S_c l_{ср}$, *см*$^3$.

По полученному значению $k$ находят из кривой величину $l_з/l_{ср}$, после чего простым вычислением определяют величину $l_з$.

Толщина немагнитной прокладки при сердечнике Ш-образной формы выбирается равной $0{,}5 l_з$ и делается из любого изоляционного материала.

На рис. 81 показан график зависимости эквивалентной магнитной проницаемости некоторых магнитных материалов от постоянного подмагничивания при оптимальной величине немагнитного зазора.

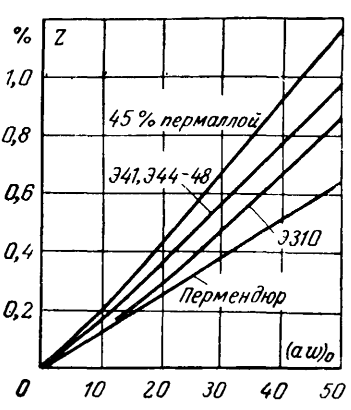



Рис. 79. График для определения коэффициента $z$.

Диаметр провода обмоток находится по формуле

$$d = 0{,}7\sqrt{I_0},$$

где $d$ — диаметр провода, *мм*;

$I_0$ — ток подмагничивания, *а*.

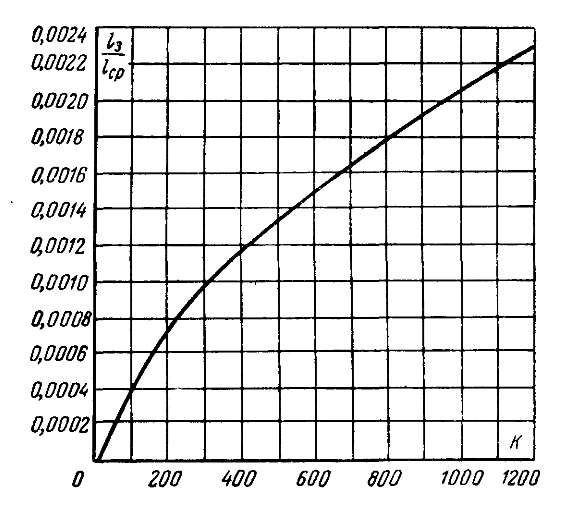



Рис. 80. График для определения величины немагнитного зазора.

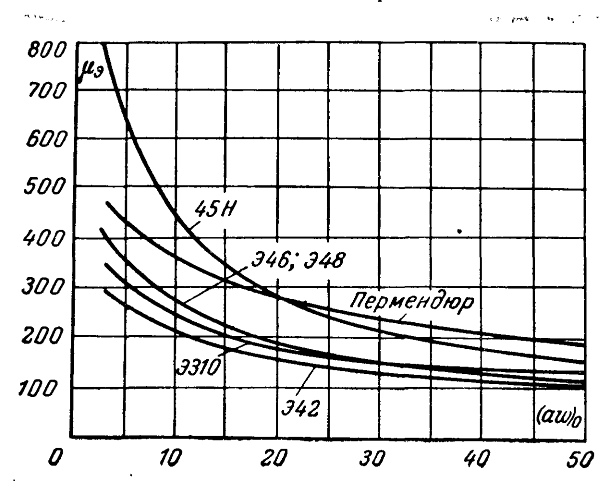



Рис. 81. График зависимости $\mu_э$ от постоянного подмагничивания при оптимальном зазоре.

## Соединение катушек индуктивности

На рис. 82 показано последовательное соединение катушек индуктивности. Общая индуктивность цепи без учета взаимной индуктивности между ними равна

$$L_{общ} = L_1 + L_2 + L_3;$$

с учетом взаимной индуктивности (рис. 82,*б*)

$$L_{общ}=L_1+L_2\pm 2M,$$

где $M$ — взаимная индуктивность, причем верхний знак берется при согласованном, а нижний — при встречном включениях.

При параллельном соединении катушек индуктивности общая индуктивность равна:

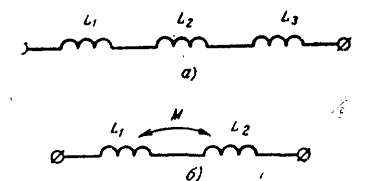



Рис. 82. Последовательное соединение катушек индуктивности.

*а* — без индуктивной связи между ними; *б* — при индуктивной связи между ними.

Рис. 83. Параллельное соединение катушек индуктивности.

*а* — без индуктивной связи между ними; *б* — при индуктивной связи между ними.

без учета взаимной индуктивности (рис. 83,*а*)

$$\frac{1}{L_{общ}}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3};$$

с учетом взаимной индуктивности (рис. 83, *б*)

$$L_{общ}=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2\pm 2M}.$$

Общая индуктивность двух параллельно соединенных катушек (при $M=0$) равна:

$$L_{общ}=\frac{L_1L_2}{L_1+L_2}.$$

На рис. 84 показана номограмма для определения общей индуктивности двух параллельно соединенных катушек. При вычислениях по номограмме величины $L_1$ и $L_2$ следует брать в одинаковых единицах.

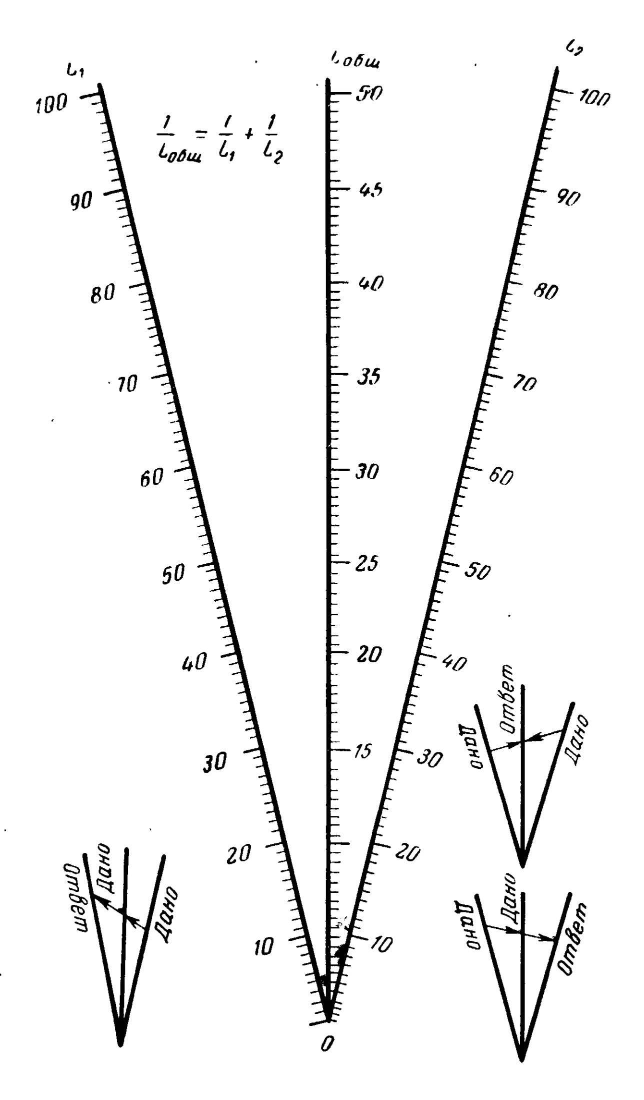



Рис. 84. Номограмма для определения общей индуктивности двух параллельно соединенных катушек.

*Глава третья*

# РАСЧЕТ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

## Основные параметры колебательных контуров

Простейший колебательный контур представляет собой последовательное или параллельное соединение двух реактивных сопротивлений противоположного знака: индуктивного $X_L$ и емкостного $X_C$.

Реактивное сопротивление катушки индуктивности $X_L$ увеличивается прямо пропорционально, а реактивное сопротивление конденсатора $X_C$ — обратно пропорционально частоте

$$X_L = 2\pi f L, \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C},$$

где $X_L$ и $X_C$ — реактивные сопротивления, *ом*;

$f$ — частота, *гц*;

$L$ — индуктивность катушки, *гн*;

$C$ — емкость конденсатора, *ф*.

Резонансной частотой $f_0$ колебательного контура называется частота, на которой индуктивное сопротивление численно равно емкостному:

$$X_L = -X_C.$$

Значение индуктивного или емкостного сопротивления контура на резонансной частоте называют характеристическим (волновым) сопротивлением

$$\rho = X_L = X_C = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Из приведенного выше равенства следует:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad \text{или} \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

откуда выводится основная формула для определения резонансной частоты колебательного контура

$$f_0^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

На практике встречаются видоизменения записи этой формулы для радиочастот

$$f_{(кгц)} = \frac{1}{6{,}28\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}}; \qquad f_{(гц)} = \frac{159}{\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}};$$

$$f_{(гц)} = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(мгн)}C_{(мкф)}}}; \quad f_{(кгц)} = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(мгн)}C_{(пф)}}};$$

$$f_{(Мгц)} = \frac{25\,330}{\sqrt{L_{(мкгн)}C_{(пф)}}}; \quad \omega_0 = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{(гн)}C_{(мкф)}}}.$$

Чтобы уменьшить резонансную частоту контура в два раза, необходимо увеличить в четыре раза емкость или индуктивность кон-

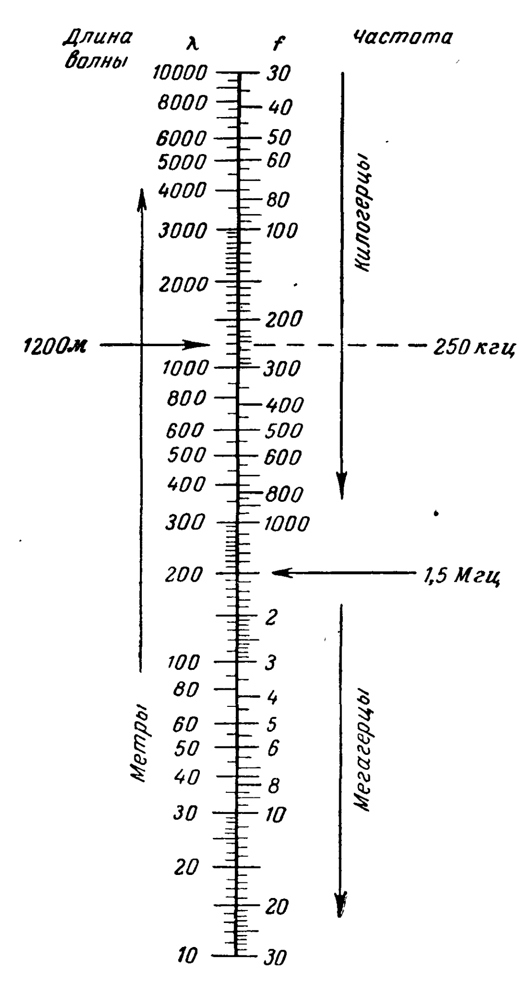



Рис. 85. График для определения длины волны и частоты электрических колебаний.

Таблица 29

## Расчет частоты $f_0$, индуктивности $L$ и емкости $C$

| N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м | N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1,0 | 159 000 | 1,89 | 47 | 76,0 | 18 200 | 16,5 |
| 1 | 1,10 | 152 000 | 1,97 | 48 | 83,0 | 17 500 | 17,1 |
| 2 | 1,20 | 145 000 | 2,07 | 49 | 91,0 | 16 700 | 18,0 |
| 3 | 1,30 | 140 000 | 2,14 | 50 | 100 | 15 900 | 18,9 |
| 4 | 1,45 | 133 000 | 2,30 | 51 | 110 | 15 200 | 19,7 |
| 5 | 1,60 | 126 000 | 2,38 | 52 | 120 | 14 500 | 20,7 |
| 6 | 1,75 | 121 000 | 2,48 | 53 | 130 | 14 000 | 21,4 |
| 7 | 1,90 | 115 000 | 2,61 | 54 | 145 | 13 300 | 23,0 |
| 8 | 2,10 | 110 000 | 2,73 | 55 | 160 | 12 600 | 23,8 |
| 9 | 2,130 | 105 000 | 2,86 | 56 | 175 | 12 100 | 24,8 |
| 10 | 2,50 | 101 000 | 2,97 | 57 | 190 | 11 500 | 26,1 |
| 11 | 2,75 | 95 800 | 3,13 | 58 | 210 | 11 000 | 27,3 |
| 12 | 3,00 | 92 000 | 3,26 | 59 | 230 | 10 500 | 28,6 |
| 13 | 3,30 | 87 400 | 3,43 | 60 | 250 | 10 100 | 29,7 |
| 14 | 3,65 | 83 300 | 3,60 | 61 | 275 | 9 580 | 31,3 |
| 15 | 4,09 | 79 600 | 3,77 | 62 | 300 | 9 200 | 32,6 |
| 16 | 4,35 | 76 100 | 3,94 | 63 | 330 | 8 740 | 34,3 |
| 17 | 4,80 | 72 000 | 4,13 | 64 | 365 | 8 330 | 36,0 |
| 18 | 5,25 | 69 500 | 4,32 | 65 | 400 | 7 960 | 37,7 |
| 19 | 5,75 | 66 300 | 4,52 | 66 | 435 | 7 610 | 39,4 |
| 20 | 6,30 | 63 400 | 4,73 | 67 | 480 | 7 260 | 41,3 |
| 21 | 6,90 | 60 500 | 4,96 | 68 | 525 | 6 950 | 43,2 |
| 22 | 7,60 | 57 600 | 5,21 | 69 | 575 | 6 630 | 45,2 |
| 23 | 8,30 | 55 200 | 5,43 | 70 | 630 | 6 340 | 47,3 |
| 24 | 9,10 | 52 700 | 5,69 | 71 | 690 | 6 050 | 49,6 |
| 25 | 10,0 | 50 300 | 5,96 | 72 | 760 | 5 760 | 52,1 |
| 26 | 11,0 | 47 900 | 6,26 | 73 | 830 | 5 520 | 54,3 |
| 27 | 12,0 | 46 000 | 6,52 | 74 | 910 | 5 210 | 56,9 |
| 28 | 13,0 | 44 100 | 6,80 | 75 | 1 000 | 5 030 | 59,6 |
| 29 | 14,5 | 41 800 | 7,18 | 76 | 1 100 | 4 790 | 62,6 |
| 30 | 16,0 | 39 800 | 7,54 | 77 | 1 200 | 4 600 | 65,2 |
| 31 | 17,5 | 38 100 | 7,87 | 78 | 1 300 | 4 410 | 68,0 |
| 32 | 19,0 | 36 500 | 8,22 | 79 | 1 450 | 4 180 | 71,8 |
| 33 | 21,0 | 34 700 | 8,65 | 80 | 1 600 | 3 980 | 75,4 |
| 34 | 23,0 | 33 100 | 9,06 | 81 | 1 750 | 3 810 | 78,9 |
| 35 | 25,0 | 31 800 | 9,43 | 82 | 1 900 | 3 650 | 82,2 |
| 36 | 27,5 | 30 400 | 9,87 | 83 | 2 100 | 3 470 | 86,5 |
| 37 | 30,0 | 29 200 | 10,3 | 84 | 2 300 | 3 310 | 90,6 |
| 38 | 33,0 | 27 700 | 10,8 | 85 | 2 500 | 3 180 | 94,3 |
| 39 | 36,5 | 26 300 | 11,4 | 86 | 2 750 | 3 040 | 98,7 |
| 40 | 40,0 | 25 200 | 11,9 | 87 | 3 000 | 2 920 | 103 |
| 41 | 43,5 | 24 100 | 12,4 | 88 | 3 300 | 2 770 | 108 |
| 42 | 48,0 | 23 000 | 13,0 | 89 | 3 650 | 2 630 | 114 |
| 43 | 52,5 | 21 900 | 13,7 | 90 | 4 000 | 2 520 | 119 |
| 44 | 57,5 | 21 100 | 14,2 | 91 | 4 350 | 2 410 | 124 |
| 45 | 63,0 | 20 000 | 15,1 | 92 | 4 800 | 2 300 | 130 |
| 46 | 69,0 | 19 000 | 15,7 | 93 | 5 250 | 2 190 | 137 |

| N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м | N f, L, C | L и C, мкгн, пф | $f_0$, кгц | λ, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 94 | 5 750 | 2 110 | 142 | 135 | 250 000 | 318 | 943 |
| 95 | 6 300 | 2 000 | 150 | 136 | 275 000 | 304 | 987 |
| 96 | 6 900 | 1 910 | 157 | 137 | 300 000 | 292 | 1 030 |
| 97 | 7 600 | 1 820 | 165 | 138 | 330 000 | 277 | 1 080 |
| 98 | 8 300 | 1 750 | 171 | 139 | 365 000 | 263 | 1 140 |
| 99 | 9 100 | 1 610 | 180 | 140 | 400 000 | 252 | 1 190 |
| 100 | 10 000 | 1 590 | 189 | 141 | 435 000 | 241 | 1 240 |
| 101 | 11 000 | 1 520 | 197 | 142 | 480 000 | 230 | 1 300 |
| 102 | 12 000 | 1 450 | 207 | 143 | 525 000 | 219 | 1 370 |
| 103 | 13 000 | 1 400 | 214 | 144 | 575 000 | 211 | 1 420 |
| 104 | 14 500 | 1 330 | 230 | 145 | 630 000 | 200 | 1 500 |
| 105 | 16 000 | 1 260 | 238 | 146 | 690 000 | 191 | 1 570 |
| 106 | 17 500 | 1 210 | 248 | 147 | 760 000 | 182 | 1 650 |
| 107 | 19 000 | 1 150 | 261 | 148 | 830 000 | 175 | 1 710 |
| 108 | 21 000 | 1 100 | 273 | 149 | 910 000 | 167 | 1 800 |
| 109 | 23 000 | 1 050 | 286 | 150 | 1 000 000 | 159 | 1 890 |
| 110 | 25 000 | 1 010 | 297 | 151 | 1 100 000 | 152 | 1 970 |
| 111 | 27 500 | 958 | 313 | 152 | 1 200 000 | 145 | 2 070 |
| 112 | 30 000 | 920 | 326 | 153 | 1 300 000 | 140 | 2 140 |
| 113 | 33 000 | 874 | 343 | 154 | 1 450 000 | 133 | 2 300 |
| 114 | 36 500 | 833 | 360 | 155 | 1 600 000 | 126 | 2 380 |
| 115 | 40 000 | 796 | 377 | 156 | 1 750 000 | 121 | 2 480 |
| 116 | 43 500 | 761 | 394 | 157 | 1 900 000 | 115 | 2 610 |
| 117 | 48 000 | 726 | 413 | 158 | 2 100 000 | 110 | 2 730 |
| 118 | 52 500 | 695 | 432 | 159 | 2 300 000 | 105 | 2 860 |
| 119 | 57 500 | 663 | 452 | 160 | 2 500 000 | 101 | 2 970 |
| 120 | 63 000 | 634 | 473 | 161 | 2 750 000 | 95,8 | 3 130 |
| 121 | 69 000 | 605 | 496 | 162 | 3 000 000 | 92,0 | 3 260 |
| 122 | 76 000 | 576 | 521 | 163 | 3 300 000 | 87,4 | 3 430 |
| 123 | 83 000 | 552 | 5[illegible]3 | 164 | 3 650 000 | 83,3 | 3 600 |
| 124 | 91 000 | 527 | 569 | 165 | 4 000 000 | 79,6 | 3 770 |
| 125 | 100 000 | 593 | 596 | 166 | 4 350 000 | 76,1 | 3 940 |
| 126 | 110 000 | 579 | 626 | 167 | 4 800 000 | 72,6 | 4 130 |
| 127 | 120 000 | 460 | 656 | 168 | 5 250 000 | 69,5 | 4 320 |
| 128 | 130 000 | 441 | 680 | 169 | 5 750 000 | 66,3 | 4 520 |
| 129 | 145 000 | 418 | 718 | 170 | 6 300 000 | 63,4 | 4 730 |
| 130 | 160 000 | 398 | 754 | 171 | 6 900 000 | 60,5 | 4 960 |
| 131 | 175 000 | 381 | 787 | 172 | 7 600 000 | 57,6 | 5 210 |
| 132 | 190 000 | 365 | 822 | 173 | 8 300 000 | 55,2 | 5 430 |
| 133 | 210 000 | 347 | 865 | 174 | 9 100 000 | 52,7 | 5 590 |
| 134 | 230 000 | 331 | 906 | | | | |

тура. Можно увеличить емкость в два раза, одновременно увеличив в два раза индуктивность. Одну и ту же резонансную частоту можно получить при разных значениях емкости и индуктивности, для этого необходимо, чтобы произведение $LC$ оставалось неизменным. Характеристическое сопротивление при этом изменится.

Таблица 30

**Частота в килогерцах для различных** *LC*

| *L*, *мкгн* | Емкость, *пф* | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
| 1 | 15 800 | 11 100 | 9 100 | 7 900 | 7 150 | 6 503 | 6 000 | 5 670 | 5 270 | 5 000 |
| 2 | 11 100 | 9 100 | 6 503 | 5 670 | 5 000 | 4 620 | 4 230 | 4 000 | 3 760 | 3 580 |
| 3 | 9 100 | 6 503 | 5 270 | 4 620 | 4 110 | 3 760 | 3 490 | 3 260 | 3 060 | 2 920 |
| 4 | 7 900 | 5 670 | 4 620 | 4 000 | 3 580 | 3 260 | 3 000 | 2 800 | 2 660 | 2 510 |
| 5 | 7 150 | 5 000 | 4 110 | 3 580 | 3 200 | 2 920 | 2 680 | 2 510 | 2 380 | 2 260 |
| 6 | 6 503 | 4 620 | 3 760 | 3 260 | 2 920 | 2 660 | 2 460 | 2 290 | 2 160 | 2 060 |
| 7 | 6 000 | 4 230 | 3 490 | 3 000 | 2 680 | 2 460 | 2 280 | 2 120 | 2 000 | 1 900 |
| 8 | 5 670 | 4 000 | 3 260 | 2 800 | 2 510 | 2 290 | 2 120 | 1 985 | 1 875 | 1 775 |
| 9 | 5 270 | 3 760 | 3 060 | 2 660 | 2 380 | 2 160 | 2 000 | 1 875 | 1 761 | 1 655 |
| 10 | 5 000 | 3 580 | 2 920 | 2 510 | 2 260 | 2 060 | 1 900 | 1 775 | 1 655 | 1 595 |
| 12 | 4 620 | 3 260 | 2 660 | 2 290 | 2 060 | 1 875 | 1 730 | 1 620 | 1 530 | 1 455 |
| 14 | 4 230 | 3 000 | 2 460 | 2 120 | 1 900 | 1 730 | 1 610 | 1 510 | 1 410 | 1 342 |
| 16 | 4 000 | 2 800 | 2 290 | 1 985 | 1 775 | 1 620 | 1 510 | 1 430 | 1 327 | 1 260 |
| 18 | 3 760 | 2 660 | 2 160 | 1 875 | 1 655 | 1 530 | 1 410 | 1 327 | 1 250 | 1 185 |
| 20 | 3 580 | 2 510 | 2 060 | 1 775 | 1 595 | 1 435 | 1 342 | 1 260 | 1 185 | 1 122 |
| 25 | 3 200 | 2 260 | 1 840 | 1 595 | 1 420 | 1 298 | 1 205 | 1 122 | 1 060 | 1 003 |
| 30 | 2 920 | 2 060 | 1 655 | 1 455 | 1 298 | 1 185 | 1 080 | 1 028 | 968 | 921 |
| 40 | 2 510 | 1 775 | 1 455 | 1 260 | 1 122 | 1 082 | 954 | 893 | 840 | 796 |
| 50 | 2 260 | 1 595 | 1 298 | 1 122 | 1 003 | 921 | 850 | 796 | 750 | 712 |
| 60 | 2 060 | 2 455 | 1 185 | 1 028 | 921 | 840 | 778 | 728 | 685 | 650 |
| 70 | 1 948 | 1 342 | 1 100 | 954 | 850 | 778 | 720 | 674 | 634 | 602 |
| 80 | 1 775 | 1 260 | 1 028 | 893 | 841 | 728 | 689 | 630 | 593 | 563 |
| 90 | 1 655 | 1 185 | 968 | 840 | 750 | 685 | 635 | 593 | 560 | 532 |
| 100 | 1 595 | 1 122 | 921 | 896 | 712 | 650 | 613 | 563 | 532 | 502 |
| 120 | 1 455 | 1 028 | 840 | 728 | 650 | 593 | 550 | 514 | 485 | 460 |
| 140 | 1 342 | 954 | 778 | 674 | 602 | 582 | 519 | 476 | 450 | 426 |
| 160 | 1 260 | 893 | 745 | 630 | 563 | 514 | 1 476 | 446 | 430 | 398 |
| 180 | 1 185 | 840 | 685 | 593 | 532 | 485 | 449 | 430 | 396 | 375 |
| 200 | 1 122 | 796 | 650 | 563 | 504 | 460 | 426 | 398 | 375 | 356 |
| 250 | 1 003 | 712 | 582 | 504 | 451 | 411 | 282 | 356 | 336 | 318 |
| 300 | 921 | 650 | 530 | 460 | 411 | 375 | 348 | 324 | 306 | 291 |
| 400 | 796 | 563 | 460 | 398 | 356 | 324 | 301 | 271 | 265 | 252 |
| 500 | 712 | 504 | 411 | 345 | 316 | 290 | 269 | 252 | 243 | 228 |
| 600 | 650 | 460 | 375 | 324 | 290 | 265 | 246 | 230 | 223 | 209 |
| 700 | 602 | 426 | 348 | 307 | 269 | 246 | 229 | 218 | 201 | 190 |

Зависимость между резонансной частотой $f_0$ контура и длиной волны выражается следующей формулой:

$$\lambda = \frac{c}{f_0},$$

где $\lambda$ — длина волны, *м*;
$f_0$ — частота, *гц*;
$c$ — скорость распространения электромагнитных колебаний, равная $3 \cdot 10^8$ *м/сек*.

На рис. 85 показан график для перевода длины волны в частоту и обратно.

Помимо приведенных формул, неизвестные значения $f_0$, $L$, $C$ и $\lambda$ могут быть найдены при помощи табл. 29. Таблица состоит из четырех граф:

$N$ — графа порядковых номеров;
$L$, $C$ — графа индуктивности и емкости контура;
$f_0$ — графа резонансной частоты контура;
$\lambda$ — графа длины волн.

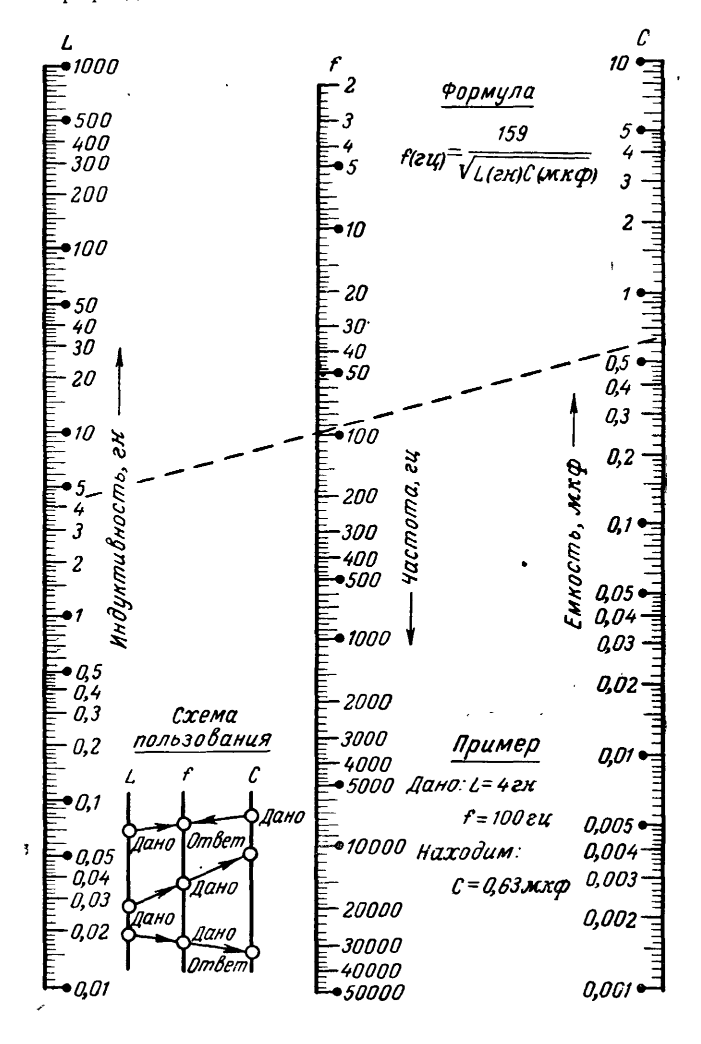



Рис. 86. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 2 *гц*—50 *кгц*.

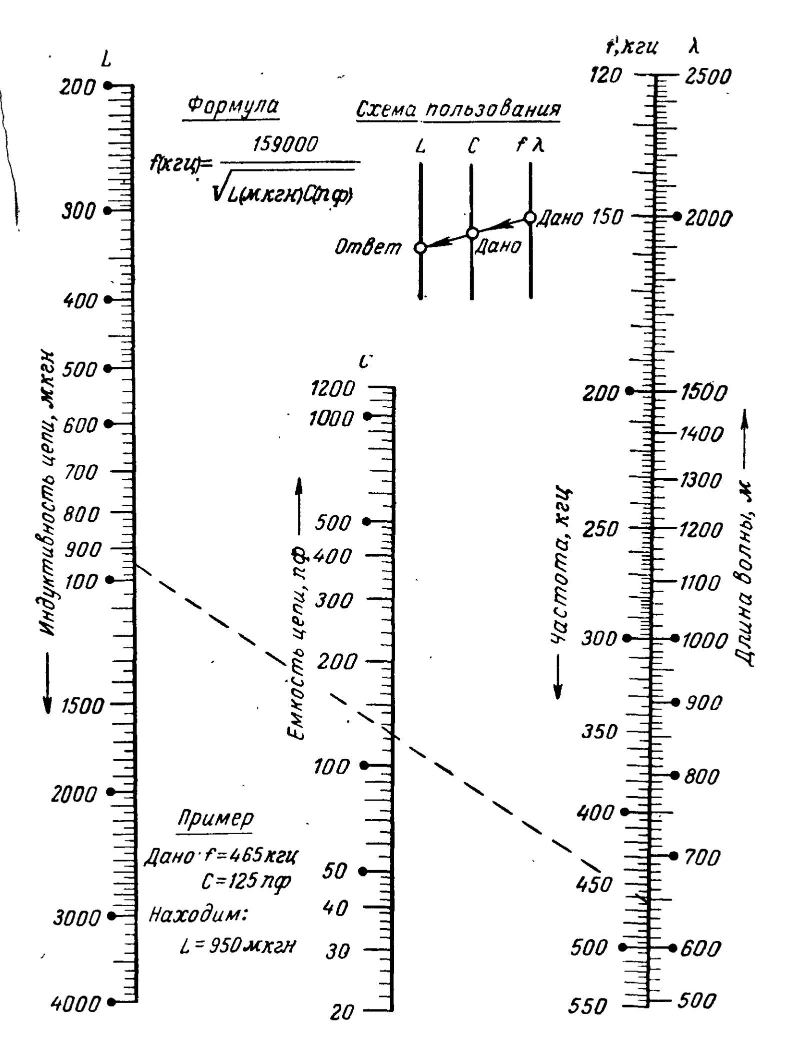



Рис. 87. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 120—550 *кгц*.

Расчет резонансной частоты контура $f_0$ по приведенной таблице сводится к сложению порядковых номеров строчек известной индуктивности и емкости. Сумма последних определяет номер строчки (графа $N$) с искомой частотой (графа $f_0$), т. е. $N_{f0}=N_C+$ $+N_L$.

Определение номера строки (графа $N$) с искомой индуктивностью или емкостью (графа $L$ или $C$) сводится к вычитанию по-

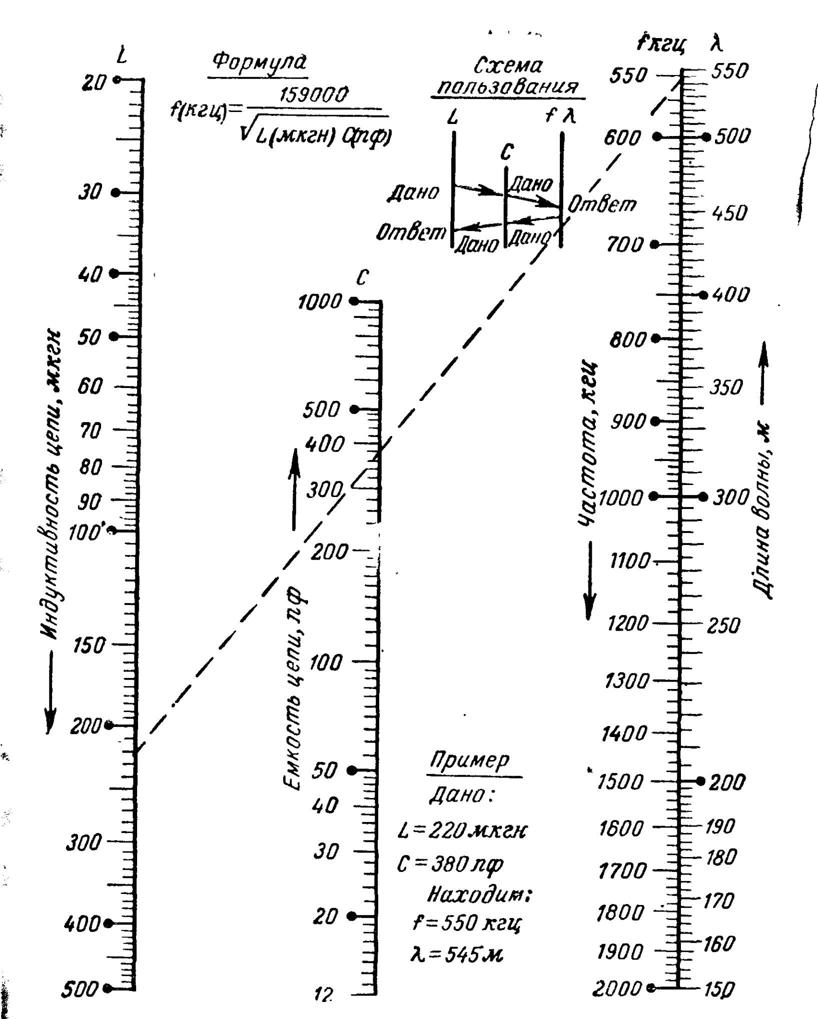



Рис. 88. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 550 *кгц*—2 *Мгц*.

рядкового номера емкости (или индуктивности) из порядкового номера известной частоты, т. е. $N_L = N_{f0} - N_C$ или $N_C = N_{f0} - N_L$.

Иногда может оказаться удобным вычислить необходимую величину емкости или индуктивности контура, не используя вспомогательную графу порядковых номеров. Для этого необходимо произведение *LC* разделить на заданную величину *L* (при определении *C*) или на заданную величину *C* (при определении *L*). В табл. 30 приведены значения резонансных частот контура при различных *LC*.

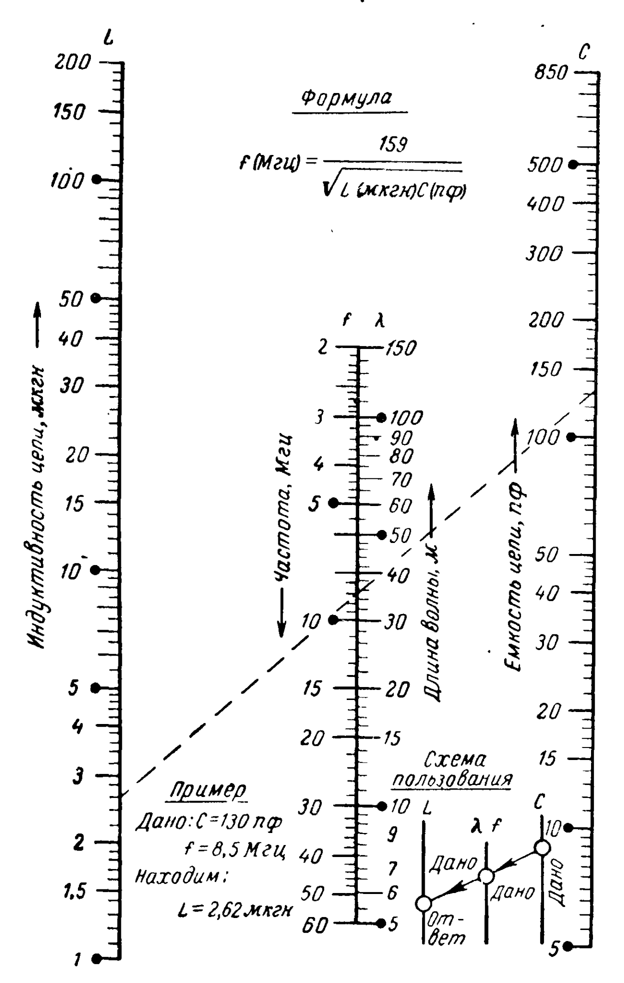



Рис. 89. Номограмма для определения резонансной частоты контура в диапазоне 2—60 *Мгц*.

На рис. 86—89 показаны номограммы для расчета резонансной частоты контура $f_0$ при известных значениях индуктивности $L$ и емкости $C$. При заданном значении частоты контура и одного из его элементов $L$ или $C$ номограммы позволяют определять значения неизвестного элемента. Номограмма, показанная на рис. 86, относится к низким частотам, на рис. 87 — к диапазону длинных волн, на рис. 88 — к диапазону средних волн и на рис. 89 — к коротким и частично ультракоротким волнам.

Выше были определены параметры идеального контура, не имеющего потерь. Реальный контур состоит из катушки индуктив-

ности, конденсатора и активного сопротивления $R$ (рис. 90). Сопротивление $R$ не существует как отдельный элемент колебательного контура. Оно условно характеризует величину потерь в катушке индуктивности и конденсаторе и называется сопротивлением потерь. Причиной потерь энергии в колебательном контуре являются: активное сопротивление проводников, утечки в изоляции, потери на излучение и др. Учитывая, что потери в конденсаторах очень незначительны, считают, что сопротивление потерь $R$ сосредоточено в катушке индуктивности.

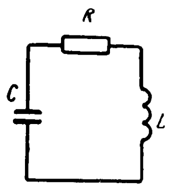



Рис. 90. Эквивалентная схема реального контура.

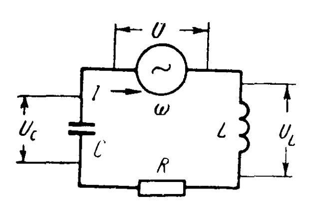



Рис. 91. Схема последовательного колебательного контура.

Резонансная частота, определяемая для колебательного контура с активным сопротивлением потерь $R$, вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}.$$

Для частот выше 100 *кгц* эта формула имеет вид

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Величину затухания колебаний в контуре принято оценивать отношением активного сопротивления $R$ к характеристическому $\rho$

$$d = \frac{R}{\rho} = \frac{R}{2\pi f_0 L} = 2\pi f_0 CR.$$

Величина, обратная затуханию, называется добротностью контура и обозначается буквой $Q$;

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{2\pi f_0 L}{R}.$$

В зависимости от того, как включен источник высокочастотной э. д. с., колебательный контур может быть последовательным или параллельным.

## Последовательный колебательный контур

На рис. 91 показана схема последовательного колебательного контура, в котором источник э. д. с. включен последовательно с $L$ и $C$ контура. В этой цепи имеется активное сопротивление $R$ и общее

реактивное $X$, образованное емкостью $C$ и индуктивностью $L$, равное

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

Полное сопротивление $z$ цепи, состоящей из включенных последовательно реактивного $X$ и активного $R$, определяется по формуле

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Величина $z$ принимает минимальное значение, равное $R$, при том значении $\omega$, для которого $X = 0$. Частота, на которой наблюдается

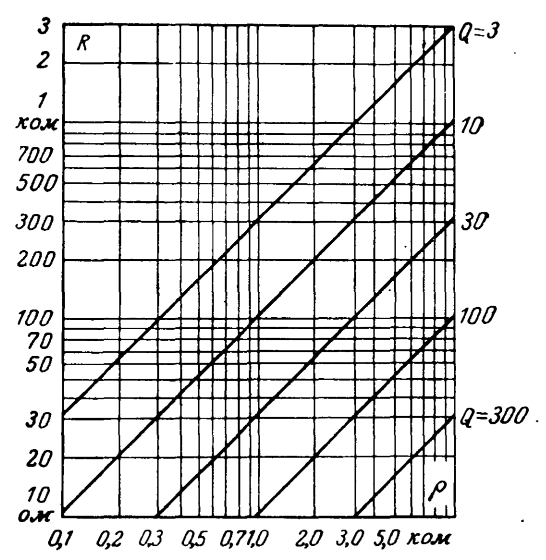



Рис. 92. Номограмма для определения резонансного сопротивления последовательного контура.

это явление, называется резонансной частотой последовательного контура и определяется из условия

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0; \quad \omega^2 = \frac{1}{LC},$$

т. е.

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

В последовательном колебательном контуре наблюдается резонанс напряжений, т. е. напряжения на реактивных элементах кон-

тура равны по величине, в $Q$ раз больше подводимого от источника напряжения, но противоположны по знаку, вследствие чего их сумма равна нулю.

Добротность последовательного контура $Q$ показывает, во сколько раз активное сопротивление контура при резонансе меньше его характеристического сопротивления:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}.$$

Величина $Q$ в основном определяется добротностью катушки индуктивности и может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен единиц. Чем меньше сопротивление потерь $R$, тем выше значение $Q$ и, следовательно, тем лучше резонансные свойства колебательного контура.

В радиолюбительских схемах величина характеристического сопротивления колебательных контуров лежит в пределах от 10 *ом* до 10 *ком*, а добротность в пределах от 3 до 300. На рис. 92 показана номограмма для определения сопротивления последовательного контура в зависимости от $Q$ и $\rho$.

Последовательный колебательный контур применяется главным образом для подавления или ослабления нежелательных частот, в цепях частотнозависимой обратной связи, а также в качестве междукаскадного согласующего устройства.

## Параллельный колебательный контур

На рис. 93 показана схема параллельного колебательного контура. Условия получения резонанса в параллельном колебательном контуре такие же, как и в последовательном. При резонансе эквивалентное сопротивление параллельного контура носит активный характер, максимально по величине и выражается следующим соотношением:

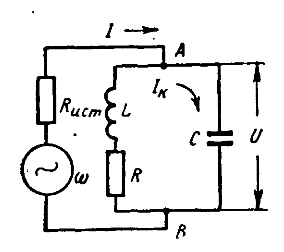



Рис. 93. Схема параллельного колебательного контура.

$$R_э = \frac{\rho^2}{R} = \frac{L}{RC} = Q\rho.$$

Добротность параллельного контура показывает, во сколько раз эквивалентное сопротивление контура больше его характеристического сопротивления

$$Q = \frac{R_э}{\rho}.$$

На рис. 94 показана номограмма для определения величины $R_э$ параллельного контура (сопротивление между точками $A$ и $B$) в зависимости от $Q$ и $\rho$, а на рис. 95 — номограмма, позволяющая определять величину $R_э$ при известных значениях $C$, $L$ и $R$.

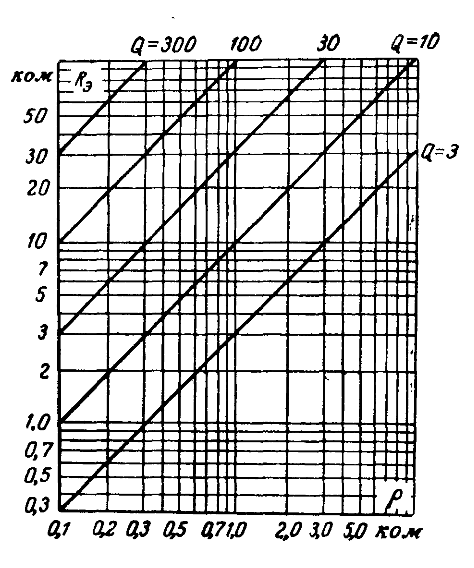



Рис. 94. Номограмма для определения резонансного эквивалентного сопротивления параллельного контура в зависимости от $\rho$ и $Q$.

На частотах, отличных от резонансной частоты контура, эквивалентное сопротивление параллельного контура падает. Если частота ниже резонансной, то эквивалентное сопротивление носит индуктивный характер; если частота выше резонансной, то эквивалентное сопротивление носит емкостный характер.

В параллельном колебательном контуре наблюдается резонанс токов, т. е. токи в реактивных сопротивлениях контура равны между собой по величине, в $Q$ раз больше тока, протекающего через источник э. д. с., но противоположны по знаку, вследствие чего их сумма равна нулю.

## Частотные характеристики одиночного колебательного контура

Колебательный контур пропускает колебания в пределах некоторой полосы частот, располагающейся по обе стороны от резонансной частоты $f_0$. Эта полоса называется полосой пропускания контура $\Pi_{пр}$ и условно определяется по резонансной кривой на уровне 0,707 от максимального значения тока или напряжения, соответствующего резонансной частоте (рис. 96). Резонансной кривой колебательного контура называется графическое изображение его амплитудно-частотной характеристики.

Для одиночного последовательного колебательного контура полоса пропускания определяется по формуле

$$\Pi_{пр} = df_0 = \frac{f_0}{Q} = 2\Delta f.$$

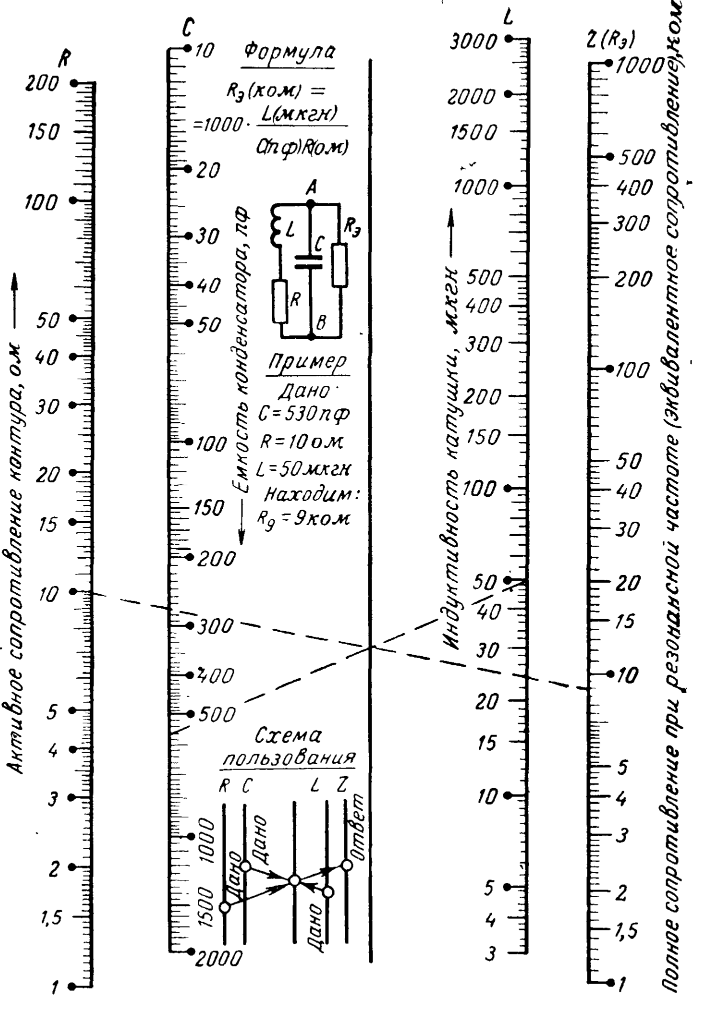



Рис. 95. Номограмма для определения эквивалентного резонансного сопротивления параллельного контура.

Для параллельного контура с учетом шунтирующего действия внешнего источника полоса пропускания равна:

$$П_{пр} = df_0 \left(1 + \frac{R_э}{R_{ист}}\right).$$

Для получения узкой полосы пропускания необходимо применять контур с высокой добротностью, а для получения широкой полосы

контур должен иметь низкую добротность. Результирующая добротность контура снижается, а полоса пропускания увеличивается при подключении параллельно контуру активного сопротивления $R_ш$, называемого шунтирующим (рис. 97). Это сопротивление вносит потери в общую цепь; чем меньше сопротивление $R_ш$, тем меньше результирующая добротность и тем больше затухание контура.

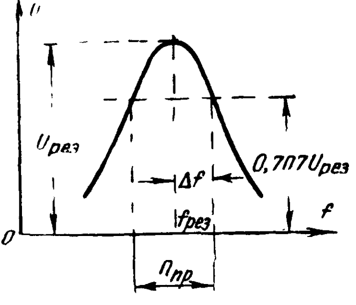



Рис. 96. Полоса пропускания контура.

Величина шунтирующего сопротивления, необходимая для получения заданной полосы пропускания, может быть найдена из выражения

$$R_ш = \frac{L}{C\left(\frac{\omega L}{Q} - R\right)}.$$

Действующая или результирующая добротность параллельного контура $Q_э$ с учетом влияния шунтирующего сопротивления $R_ш$ опре-

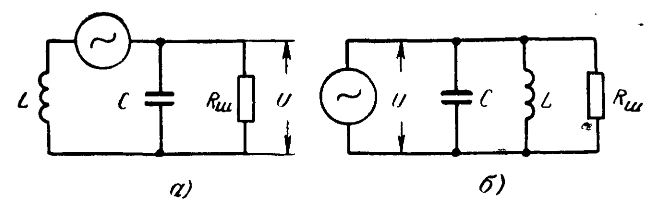



Рис. 97. Шунтирование контура активным сопротивлением.

деляется по формуле

$$Q_э = Q\frac{1}{1 + Q\frac{\rho}{R_ш}},$$

где $Q$ — добротность контура без учета влияния сопротивления $R_ш$;
$\rho$ — характеристическое сопротивление контура.

Необходимые значения индуктивности и емкости контура для получения заданной добротности находятся как

$$L = \frac{R_ш(Q - Q_э)}{\omega Q Q_э}; \quad C = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

Резонансная кривая колебательного контура описывается уравнением

$$\frac{U}{U_{\text{рез}}} = \frac{I}{I_{\text{рез}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\Delta f}{f_0}Q\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{Q}{50}\Delta\%\right)^2}}.$$

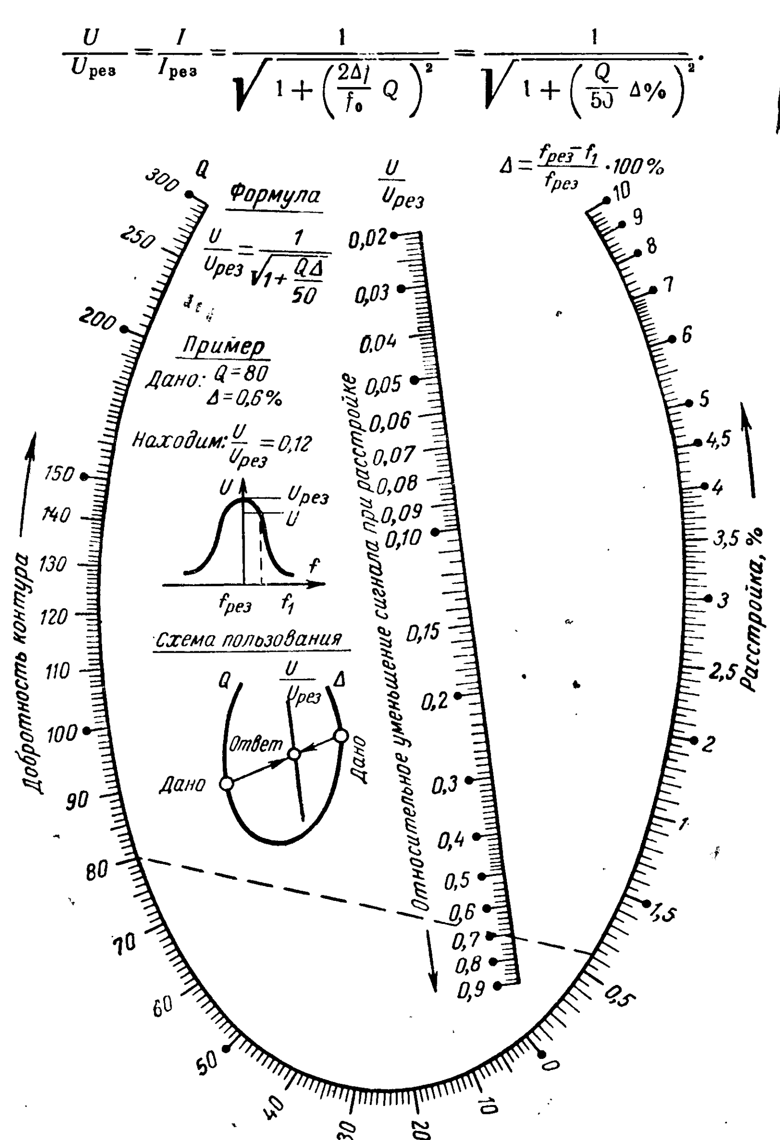



Рис. 98. Номограмма для определения ослабления сигнала, частота которого отличается от резонансной.

В этом уравнении отношения $U/U_{рез}$ и $I/I_{рез}$ показывают, какая часть максимально возможных (при резонансе) напряжений или токов получается при заданной расстройке Δ, которая определяется как

$$\frac{f - f_0}{f_0} 100,$$

где $f$ — частота действующей на контур э. д. с.;
$f_0$ — резонансная частота контура.

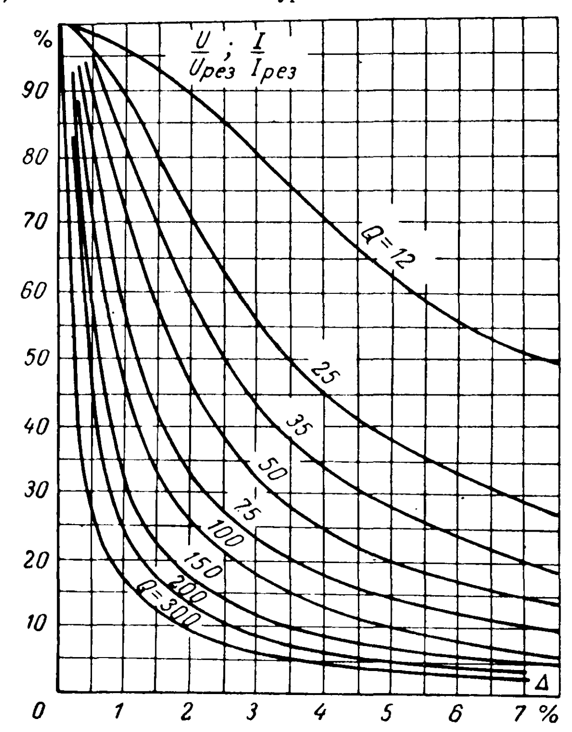



Рис. 99. Резонансные кривые последовательного контура в зависимости от $Q$ и процентной расстройки.

На рис. 98 показана номограмма, позволяющая определять ослабление сигнала, частота которого отличается от резонансной частоты контура. С помощью этой номограммы можно определять напряжения на элементах последовательного контура и напряжение на параллельном контуре при заданной расстройке. Для этого при заданной расстройке Δ и величине $Q$ определяется отношение $U/U_{рез}$, как показано на номограмме. Из этого отношения определяется величина $U$. Напряжение на конденсаторе или катушке индуктивности последовательного контура будет равно $UQ$. Аналогично определя-

ется величина напряжения на параллельном контуре. Следует отметить, что приведенная методика справедлива для малых расстроек.

На рис. 99 показан график, дающий форму верхней части резонансной кривой последовательного контура в зависимости от расстройки в отношениях токов или напряжений, выраженной в процентах, а на рис. 100 — в децибелах. Найденные из графиков величины справедливы для малых расстроек любого знака. По этим графикам можно определить напряжение на параллельном контуре при извест-

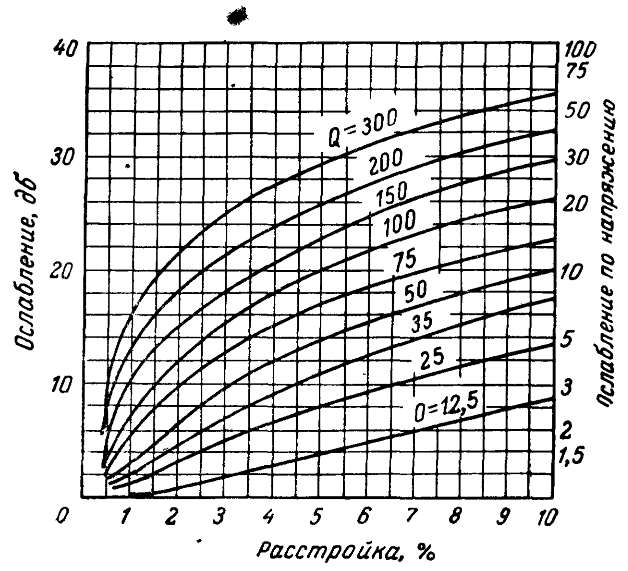



Рис. 100. Ослабление сигнала по резонансной кривой последовательного колебательного контура.

ных значениях $Q$, $\Delta$ и $U_{рез}$. Например, определим величину напряжения на контуре с добротностью $Q=50$ при расстройке в пределах $\pm 3\%$. По графику на рис. 99 находим, что напряжение на контуре будет составлять 32% от $U_{рез}$. По формуле

$$U=\frac{U_{рез}\cdot 32}{100}$$

определим значение $U$ при заданной расстройке.

Избирательностью контура называют величину, показывающую, во сколько раз помеха, отстоящая по частоте от резонанса на заданную расстройку, усиливается слабее сигнала, совпадающего по частоте с резонансной. Избирательность может быть определена по формуле

$$S=\frac{U_{рез}}{U}\sqrt{1+\left(\frac{Q}{50}\Delta\%\right)^2}.$$

При больших расстройках избирательность приближенно равна:

$$S = Q\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right).$$

На рис. 101 показана обобщенная резонансная кривая последовательного контура, построенная для небольших расстроек. По этой кривой можно вычислить добротность по заданным значениям избирательности, рабочей частоты и расстройки.

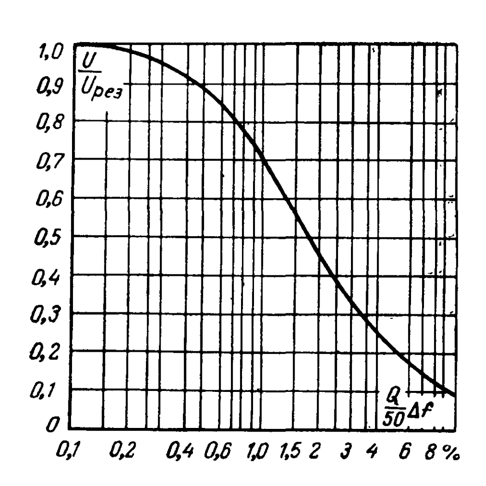



Рис. 101. Обобщенная резонансная кривая одиночного последовательного контура.

## Связанные контуры

Если два или более колебательных контура имеют электрическую или магнитную связь, то такие контуры называются связанными. Общий элемент, через который контуры связаны друг с другом, называется элементом связи.

Величина связи характеризуется коэффициентом связи $k_{св}$, который может иметь значения от 0 до 1

$$k_{св} = \frac{X_{св}}{\sqrt{X_1 \cdot X_2}}; \quad 0 \leqslant k_{св} \leqslant 1,$$

где $X_{св}$ — общее для обеих цепей реактивное сопротивление элемента связи;

$X_1$ и $X_2$ — сопротивления контуров, одноименные с сопротивлением элемента связи.

Изменение режима работы одного контура из-за влияния другого оценивается с помощью вносимых сопротивлений. Влияние второго

контура на первый сводится к внесению в первый контур сопротивлений — активного

$$R_{вн} = \frac{X_{св}^2}{Z_2^2} R_2$$

и реактивного

$$X_{вн} = -\frac{X_{св}^2}{Z_2^2} X_2,$$

где $Z_2$ — полное сопротивление второго контура.

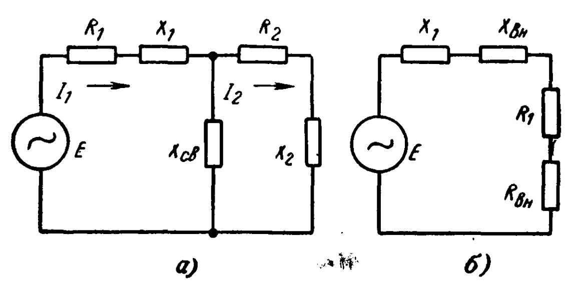



Рис. 102. Связанные контуры (*а*) и их эквивалентная схема (*б*).

На рис. 102 показана эквивалентная схема первого контура с учетом влияния на него второго контура. Резонанс в этой системе наступает при

$$X_1 - \frac{X_{св}^2}{Z_2^2} X_2 = 0,$$

считая, что $Z_2 \approx X_2$,

$$X_1 X_2 - X_{св}^2 = 0.$$

На практике используется несколько различных видов связи. На рис. 103 показана схема индуктивной связи между контурами. Контур $L_1C_1$, получающий энергию от внешнего источника э. д. с, назы-

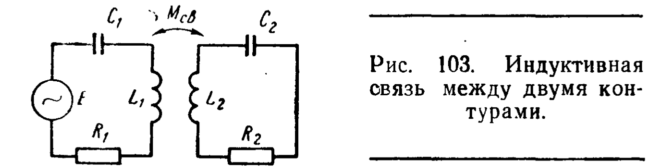



Рис. 103. Индуктивная связь между двумя контурами.

вается первичным контуром. Контур $L_2C_2$, получающий энергию от первичного контура, называется вторичным. При индуктивной связи ток первичного контура, проходя через катушку $L_1$, создает вокруг нее магнитное поле, силовые линии которого пересекают витки ка-

тушки $L_2$ и возбуждают в ней э. д. с. Эта э. д. с. создает во вторичном контуре ток, величина которого зависит от сопротивления связи $X_{св}$ и коэффициента связи $k_{св}$, которые равны:

$$X_{св} = \omega M_{св}; \quad k_{св} = \frac{M_{св}}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где $M_{св}$ — коэффициент взаимной индуктивности.

Для получения максимального тока и напряжения в контурах их настраивают в резонанс. В первичном контуре может быть либо резонанс напряжений, либо резонанс токов в зависимости от способа

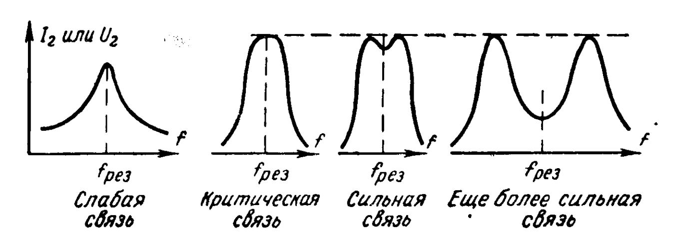



Рис. 104. Кривые резонанса двух связанных контуров при различной величине связи.

включения внешнего источника в этот контур. При небольших коэффициентах связи эквивалентный контур, состоящий из двух контуров, имеет одну резонансную частоту. Резонансная кривая имеет один максимум до так называемой критической связи. При дальнейшем увеличении связи обнаруживаются две резонансные частоты

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1 - k_{св}}}; \quad f_2 = \frac{f_0}{\sqrt{1 + k_{св}}},$$

которые отличаются друг от друга тем больше, чем сильнее связь между контурами (рис. 104). Эти частоты называются частотами связи. Зависимость частот связи от коэффициента связи показана на рис. 105. Связанные контуры позволяют регулировать полосу пропускания изменением степени связи между ними. До критической связи полоса пропускания двух одинаковых индуктивно связанных контуров равна полосе пропускания каждого контура. При дальнейшем увеличении связи полоса пропускания расширяется, но равномерность пропускания частот ухудшается, так как на резонансной кривой появится впадина. Коэффициент $\beta$, определяющий глубину провала, определяется по формуле

$$\beta = \frac{X_{св}}{R} = Qk_{св}.$$

Связь между контурами считается критической при $\beta = 1$.

На рис. 106 показаны обобщенные кривые для двух связанных контуров, где на вертикальной оси отложена величина ослабления

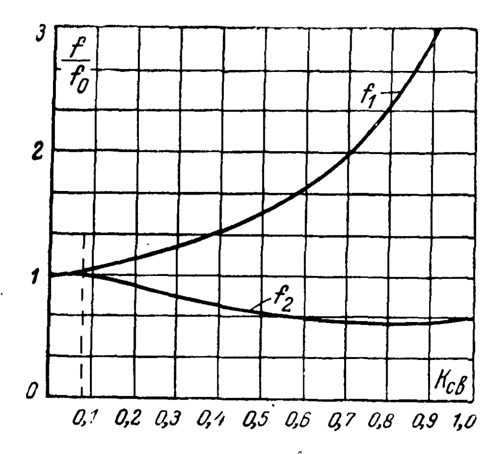



Рис. 105. График зависимости частот связи от коэффициента связи.

Рис. 106. Обобщенные кривые для двух связанных контуров.

сигнала, отличного от резонансной частоты $\sigma$, а на горизонтальной оси даны значения обобщенной расстройки

$$\alpha = 2Q \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{Q}{50} \Delta\%.$$

Выбрав кривую, соответствующую $\beta = 1$, следует отыскать на ней точку, лежащую на уровне $\sigma_1$ и прочитать соответствующее ей значение $\alpha_1$. При этом расчетное значение добротности контура составит:

$$Q_р = \frac{\alpha_1 f_0}{2F_в},$$

где $F_в$ — верхняя граничная частота полосы пропускания.

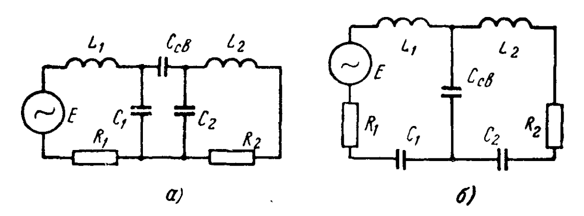



Рис. 107. Схема емкостной связи.
*а* — внешняя емкостная связь; *б* — внутренняя емкостная связь.

Полученное значение $Q_р$ следует сопоставить с конструктивно осуществимой добротностью контура $Q_к$. В табл. 31 приведены ориентировочные значения добротности контуров с катушками различных типов.

Таблица 31

**Ориентировочные значения добротности контуров**

| Резонансная частота $f_0$ | Добротность $Q_к$ | | Наилучший материал для сердечника |
|---|---|---|---|
| | без ферромагнитного сердечника | с ферромагнитным сердечником | |
| 0,1—1 *кгц* | — | 4—20 | Пермаллой |
| 1—10 *кгц* | — | 10—50 | Феррит |
| 10—100 *кгц* | — | 30—150 | » |
| 0,1—1 *Мгц* | 20—100 | 100—300 | » |
| 1—10 *Мгц* | 50—150 | 100—250 | Карбонильное железо |
| 10—100 *Мгц* | 100—250 | — | — |

Если $Q_р < Q_к$, то в дальнейшем следует считать $Q = Q_р$. При $Q_р > Q_к$ следует считать добротность контуров равной $Q_к$ и выбрать другую кривую $\beta$.

На рис. 107,*а* изображена схема емкостной связи между двумя контурами, в которой конденсатор связи $C_{св}$ не входит в состав первичного и вторичного контуров. Такая связь называется внешней емкостной связью. В этой схеме напряжение первичного контура действует через конденсатор связи $C_{св}$ на вторичный контур и создает

в нем ток. Коэффициент связи определяется по формуле

$$k_{св} = \frac{C_{св}}{\sqrt{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}.$$

Необходимо указать, что связь между контурами необходимо устанавливать достаточно точно, так как форма резонансной кривой системы связанных контуров очень чувствительна к изменению величины связи. В этом отношении внешняя емкостная связь имеет

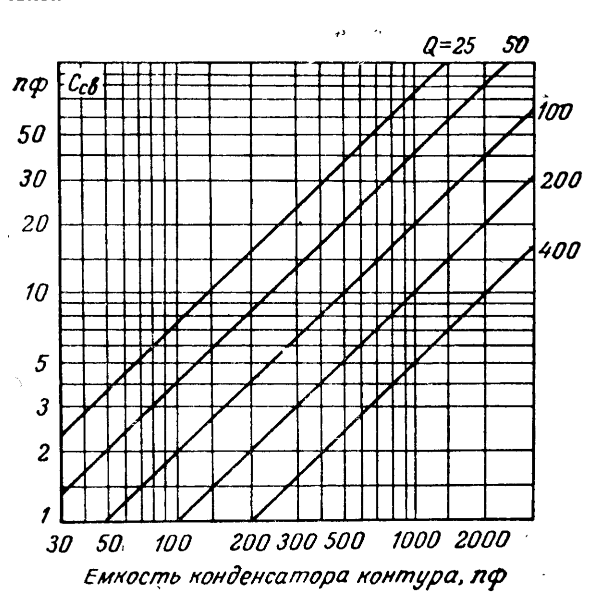



Рис. 108. График для расчета величины емкости конденсатора связи $C_{св}$.

преимущество перед другими типами связи, особенно при использовании малогабаритных катушек индуктивности.

В любительских схемах величина емкости контура находится в пределах от 30 до 3 000 *пф*, а добротность контура — в пределах от 10 до 300. На рис. 108 показан график для расчета величины емкости конденсатора связи $C_{св}$ при различных значениях добротности $Q$ и емкости контура $C$. Полученная величина $C_{св}$ обеспечивает связь между контурами, равную или несколько больше критической.

В схеме с внутренней емкостной связью (рис. 107,*б*) напряжение, которое получается на конденсаторе связи $C_{св}$ при прохождении через него тока, действует на вторичный контур и создает в нем ток. В схеме с внутренней емкостной связью чем больше емкость $C_{св}$, тем слабее связь. Для осуществления слабой связи в этой схеме величина $C_{св}$ берется порядка тысяч пикофарад.

Сопротивление связи и коэффициент связи определяются по формулам

$$X_{св} = -\frac{1}{\omega C_{св}}; \quad k_{св} = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}.$$

# ЛИТЕРАТУРА


1. Гинкин Г. Г., Справочник по радиотехнике, Госэнергоиздат, 1948.
2. Терещук Р. М. и др., Справочник радиолюбителя, Изд-во технической литературы УССР, Киев, 1961.
3. Волгов В. А., Детали контуров радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1954.
4. Азарх С. Х., Конденсаторы переменной емкости, изд-во «Энергия», 1965.
5. Ренне В. Т., Багалей Ю. В и Фридберг И. Д., Расчет и конструирование конденсаторов, изд-во «Техника», Киев, 1966.
6. Цейтлин Л. А., Индуктивности проводов и контуров, Госэнергоиздат, 1950.
7. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А., Расчет индуктивности, Госэнергоиздат, 1955.
8. Майоров А. С., Альбом частотных характеристик добротности катушек индуктивности на броневых сердечниках, Госэнергоиздат, 1958.
9. Матвеев Г. А. и Хомич В. И., Катушки с ферритовыми сердечниками, изд-во «Энергия», 1967.
10. Шольц Н. Н. и Пискарев К. А., Ферриты для радиочастот, изд-во «Энергия», 1966.
11. Волгов В. А., Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Энергия», 1967.
12. Жеребцов И. П., Радиотехника, изд-во «Связь», 1965.
13. Асеев Б. П., Колебательные цепи, Изд-во по вопросам связи и радио, 1955.
14. Хайкин С. Э., Электромагнитные колебания и волны, изд-во «Энергия», 1964.
15. Цыкин Г. С., Трансформаторы низкой частоты, Изд-во по вопросам связи и радио, 1955.

# ОГЛАВЛЕНИЕ